



琉球大学学術リポジトリ

University of the Ryukyus Repository

Title	三次元はく離流れ場における熱伝達特性
Author(s)	親川, 兼勇; 鳥羽山, 昌史; 瀬名波, 出; 屋我, 実
Citation	琉球大学工学部紀要(49): 19-26
Issue Date	1995-03-31
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/9607
Rights	

三次元はく離流れ場における熱伝達特性

親川 兼 勇* 鳥羽山 昌 史**
 瀬名波 出* 屋 我 実*

Characteris of Heat Transfer on Three Dimensional Separated Flow Region

Kenyu OYAKAWA* Masashi TOBAYAMA**
 Izuru SENAHA* Minoru YAGA*

Abstract

The local heat transfer coefficients were measured for three dimensional separated flow in order to obtain the basic information of heat transfer characteristics around the cylinder perpendicularly set the heating surface. The flow region was constructed by the three parts of lower, upper and back walls and its geometric configuration is like a T type having the duct connected perpendicularly with straight duct. The working fluid, air, flows downstream against the adverse pressure gradient formed due to the existence of the back wall. The result of the heat transfer corresponds to the data obtained for the flow pattern in the visualization test by using oil film method. The Nusselt number at the flow detached from the wall surface exhibits its well-known Reynolds number dependence of $Re^{2/3}$. On the back wall, the mechanism of the heat transfer is essentially the same to that of impingement jet flow.

Key Words : Convective heat transfer, Separated flow, Vortex,
 Flow visualization, Three dimensional fin.

1. 緒 言

伝熱を促進させる方法としては、取り扱う流動場によって種々の形式が考えられる⁽¹⁾⁽²⁾。その中で熱伝達率増進効果の高いものとして、伝熱面に付着して設置された乱流促進体が考えられる。乱流促進体そのものは伝熱面積の増大に加えて伝熱面近傍流れに攪乱を与え、熱伝達率を増大せしめるからである。その際の流動抵抗は流路断面の中央に置かれた促進体のに比べて低い。そのために熱伝達率増大の割合に比べて流動抵抗が小さくなり、結果として熱的性能比が高くなる。

一方流動抵抗の大きい場合には流路内の作動流体の流量が少なくてよく、高価な冷媒等を用いるのには有利となる。冷却・あるいは加熱を通常の空気などを用いて行う場合には流動抵抗の小さい伝熱促進体を用いる方がエネルギー的に望ましい⁽³⁾。

伝熱面に付着した促進体としては、突起が余り高くない場合の粗面管⁽⁴⁾、二次元の突起⁽⁵⁾や、くぼみ⁽⁶⁾および三次元突起⁽⁷⁾など、種々ありそれぞれ研究がなされてきた。

工学的には、通常の流れ場は三次元乱流境界層が形成されており、またそれらのはく離場を取り扱うよう

受理：1994年11月10日

*機械システム工学科 Dept. of Mechanical Systems Engineering, Fac. of Eng.

**日本電装株式会社 Nippon Denso Co., Ltd.

な課題が多い。たとえば壁面に直立する有限な高さをもつ物体などがその例である。しかしながら、これら三次元的形状となる促進体をもつ場合の流れ場・熱伝達特性は、二次元的形状のに比べて複雑であり、周囲の基本的流れ構造および伝熱機構の詳細な解明がより必要となろう。とりわけ三次元はく離流と後流との干渉などによる流れの非定常性の問題が挙げられる。河村ら⁸⁾は種々の高さ、径の円柱群をもつ三次元突起の熱伝達促進を目的とし、流れ場の詳細な検討、流れの可視化などにより伝熱促進機構を論じ、実用上の指針を与えている。しかし、これらの機構は促進体が下流に誘起する二次流れの構造、とりわけ促進体を乗り越えた流れのはく離・再附着および過流動によることに注目している。促進体の周囲流れを取り扱ってはいるが、設置部分の根元前方の流れおよびその影響については余り言及していないように思われる。

本阿弥ら⁹⁾は三次元乱流境界層のはく離を理解するために、完全な三次元乱流境界層の中に埋設する対称面上のはく離およびはく離領域の非定常構造を明らかにしている。すなわち平面上に無限大の曲率をもつ背壁を置き、それに垂直な流路から流入した流れが背壁に衝突したのち、それに平行な流路を通して左右より外部に流れる。上下を壁面で囲うことにより直線流路とテスト部の流路がT字形の配置となる。流れは背壁の存在による逆圧の勾配に逆らいつつ背壁に衝突し、その後側から流出していくが、流れは三次元はく離場となる。主流中央部の対称面上(x, y 面)での流れ場をサーマルタフトおよびスモークワイヤを用いて背壁近くに出来る首かざり状のはく離渦、その上流に形成される別のはく離を確認している。またこれらの渦は互いに干渉せず、全く別の生成機構をもつことを示している。実験は流路高さ $H=100\text{mm}$ で行っているためにはく離泡の寸法に対して小さく、上下壁のはく離渦が互いに干渉し合う可能性があったために、実験装置の寸法を二倍程大きくし再実験を行い、前述の二つのはく離泡を含む互いに生成機構の全く異なる四つの渦の存在を明らかにした¹⁰⁾。ただ流れ場のみの実験であり、これらの渦が伝熱機構にどのように影響するかについては論じてない。

本研究は三次元はく離流れ場での熱伝達特性およびその伝熱機構の基本的な情報を得るために、本阿弥らとほぼ同様な実験装置を用い、熱伝達率の測定を行った。三次元乱流促進体の前方の熱伝達特性が明らかになれば、フィンの形状およびピンフィンなどの設置

位・配列などに貴重な資料を提供するものと思われる。そのために対称面のみでなく、テスト部の下壁および背壁面の全面に亘って時間平均熱伝達率分布を得た。また油膜法により流動場の可視化を行い、はく離位置、はく離渦の大きさなどと熱伝達率との対応を明らかにした。

- 記号
- z : 流路の高さ
 - h_x : x 方向の局所熱伝達率
 - h_z : z 方向の局所熱伝達率
 - L : 入口から背壁までの長さ
 - Nu : ヌッセルト数 $=h_x \cdot H / \lambda$
 - Re : レイノルズ数 $=U \cdot H / \nu$
 - U : 直線流路内平均速度, 入口速度
 - x : 入口から背壁方向への路離
 - y : 対称面からそれに垂直な距離
 - z : 下壁面から鉛直上向きの距離
 - λ : 流体の熱伝導率
 - ν : 流体の動粘性係数
- 添字
- max : 最大値を示す

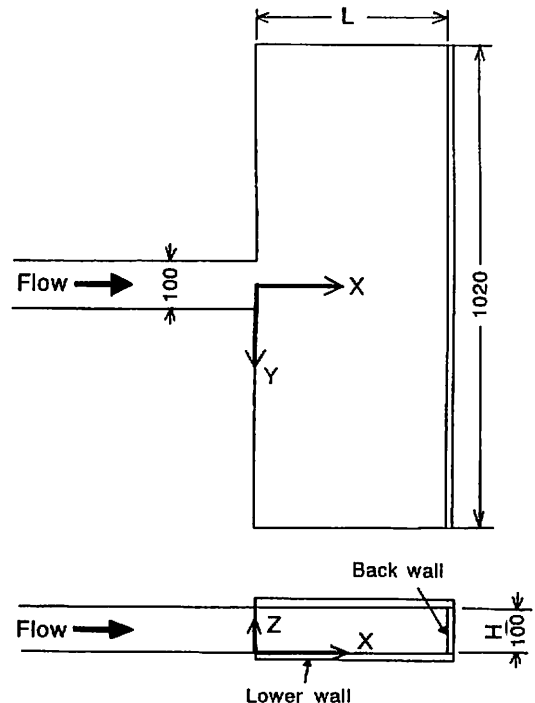


Fig. 1. Experimental apparatus, dimensions and symbols

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。流路は吹き出し形で、幅100mm、高さ $H = 100\text{mm}$ の正方形断面の長さ1000mmの直線流路にテスト用の流路がT字に連結されている。テスト部の流路は高さ $H = 100\text{mm}$ で、直線流路の出口部から主流が衝突する背壁までの距離が $L = 350$ または 250mm 、長さ 1020mm である。

その中央部に直線流路が連結されている。座標系 x, y, z を図1に示す。 y は対称面からの距離をとっている。対称面(xz 面)では図1に示すように流れは逆圧力勾配に逆らって背壁に衝突するために、背壁近くにはく離渦、その上流にもう一つのはく離渦が形成される。それらは y 方向に軸をもち、回転しながら外部に流出される。テスト部の流路の上下壁および背壁は厚さ 20mm のベークライト板に厚さ $30\mu\text{m}$ のステンレス箔を接着し、直流電源により通電加熱された熱流束 q_w 一定の伝熱面よりなっている。その場合の壁面温度 t_{wx} は直径 $70\mu\text{m}$ の銅-コンスタンタン熱電対をステンレス箔裏面にハンダ付し、その熱起電力を $1\mu\text{V}$ の精度で測定することにより求めた。銅-コンスタンタン熱電対は上下壁のはほぼ中央にそれぞれ79本、背壁に39本の合計197本が設けられている。熱伝達率 h_x は主流温度 t_{∞} を基準として $h_x = q / (t_{wx} - t_{\infty})$ より求めた。ここで熱流束は $q_w \approx 490\text{W/m}^2$ であり、ベークライトを

通して外部へ散逸する量は1%以下であった。温度差($t_{wx} - t_{\infty}$)は多くの場合 $4 \sim 5\text{K}$ 以上であり、熱伝達率 h_x は十分な精度をもっている。上下および背壁の全面的な温度分布はテスト部を直線流路に対して相対的に移動させることにより、熱電対の空間的位置を補うことにより求めた。流れ模様はカーボンブラックを適当な粘度の機械油との混合液を上壁面および背壁面に塗布し、流れにさらした後、その流跡の写真撮影を行った。入口の平均流速を $U = 10 \sim 30\text{m/s}$ に変化させた。それは流路高さ $H = 100\text{mm}$ を代表長さにとったレイノルズ数 $Re (= U \cdot H / \nu) = 62,000 \sim 186,000$ に対応する。

3. 実験結果および考察

3.1 熱伝達特性

直線流路から流出した流れは $y = 0$ の対称面(x, z)が背壁面での分岐線となり、それを境に背壁に沿って左右に流れる。対称面上をみると、背壁の存在による逆圧力勾配に逆らう形で流れ、上下壁と背壁に三次元突起等にみられる首かざり状を呈する背壁に平行な軸をもつ大きなはく離渦が形成される。首かざり状のはく離渦の上流域で流れは、背壁に向うのと左に分岐しようとするのがあり、その位置で最初のはく離が起こり、小さなはく離渦が形成される。これも背壁と平行

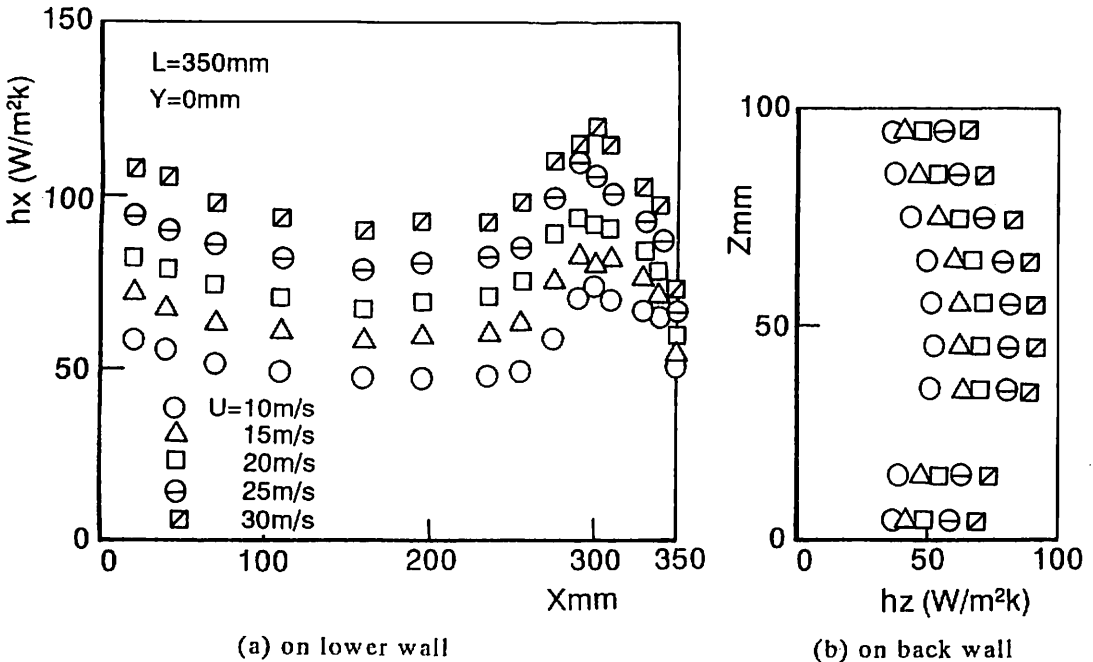


Fig.2. Variation of the local heat transfer coefficients with velocity

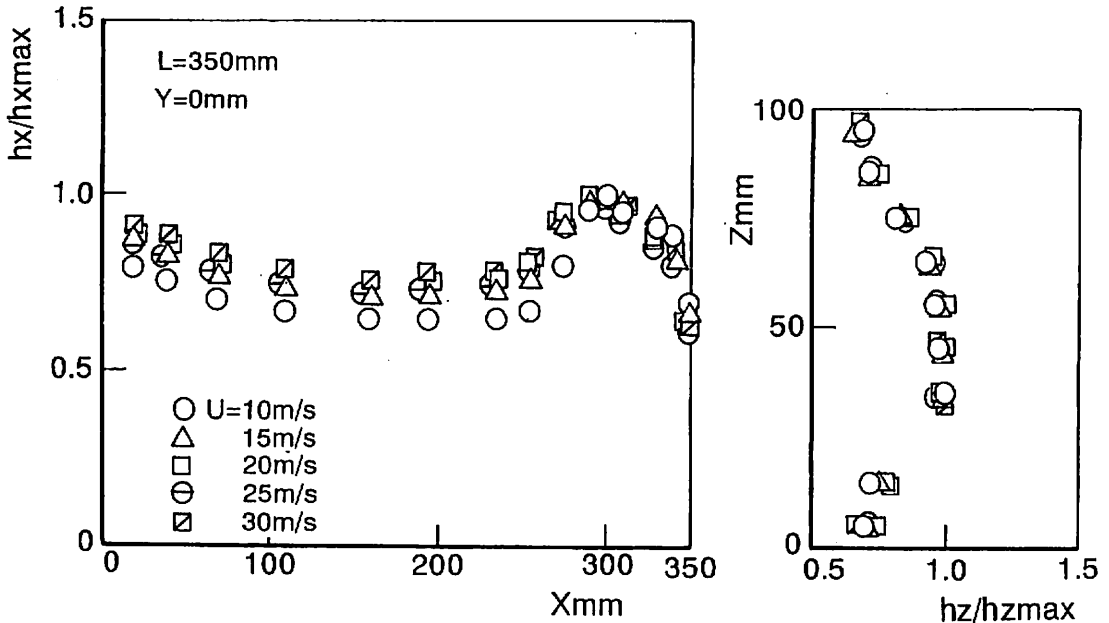


Fig.3. Variation of the ratio of local heat trans coefficient to maximum heat transfer coefficient with velocity

な軸をもつ。両はく離渦は互いに同方向の回転をする順流渦である。ここで、これらの渦のスケールに対して流路高さ H が適当な大きさであるかの問題が起る。 H によっては渦そのものが互いに干渉し合い抑制されている可能性もあるからである。本来なら、この H が三次元はく離渦を解明する上で重要となるが、本研究は三次元はく離流れ場における物体前方の熱伝達特性を知ることが目的としており、その第一歩として H を一定としている。またはく離渦が入口から背壁までの長さ L にどのように影響されるかを $L=350, 250\text{mm}$ の2種類で調べたが、はく離渦の大きさなどは L が著しく小さくなければはく離渦はほぼ同一スケールの寄与に興味を注がれていることを考えると、 $L=250\text{mm}$ とした場合でも本質的には $L=350\text{mm}$ と同じであり、ここでは主に $L=350\text{mm}$ について述べ、問題の簡単化を図る。

まず対称面の x 方向の局所熱伝達率分を流速を10~30m/sに変化させた場合を図2(a)に示す。入口から背壁方向に沿って境界層の発達、および流路の拡がりによる流速の減少により h_x は減少し、 $x/L=0.5$ で極小を示したのち、上昇し、 $x/L=0.833$ で極大値をとり、その後減少する。これは流速を増加させてもその変化

の様子は概ね変わらない。詳しくみると、極大値近傍の分布形は U が小さいとならからで、流速とともにピークが上流に移動し、かつ分布はシャープとなる傾向を示す。これは流速とともに大きなはく離渦がより顕著に作用することを示しており、さらに上流のはく離渦より熱伝達率分布に大きな影響を及ぼしているものと思われる。

つぎに背壁の対称面の z 方向の熱伝達率の分布 h_z を図2(b)に示す。中央部が高く、上下壁面に近い所で低くなる傾向を示す。これは対称面の上下壁面の影響を余り受けない流体が中央部に衝突し、 $z=0, 100\text{mm}$ 近傍は中央部からの分岐流れによる熱伝達率であり、中央部より低い値を示す。ただ後述するが、この $z=0, 100\text{mm}$ の領域の熱伝達率はコーナー渦によるものであり、下壁面の背壁近くの数とはほぼ等しくなる。これらの分布を最大熱伝達率 $h_{x_{max}}, h_{z_{max}}$ を基準にして示すと図3となる。入口部での熱伝達率の流速による増大に比べて、最大熱伝達率は余り増大してなく、レイノルズ数の依存性が場所により異なり、局所熱伝達率の伝熱機構が異なることが分る。背壁においては、ほぼ最大熱伝達率で整理でき、基本的には背壁では流れの衝突による伝熱機構と思われる。流速によって全体的

には余り変化しないようであるが、各位置における局所値と速度との関係を図4に示す。図2における $x=0mm, 200mm, 250mm$ 、最大の位置、すなわち入口部、最小、上昇し始めるおよび極大の位置での局所熱伝達率である。まず $x=0, 200mm$ では $hx \propto U^{0.58}$ に比例している。これは通常の乱流熱伝達率のレイノルズ数の依存性が0.8乗に比べて小さく、乱流境界層の発達に加えて流れの減速の影響がでている。上昇し始める位置は、はく離が起る位置とほぼ対応していると思われるが、ここでは hx の $U^{0.67}$ で従来のはく離・再付着の $Nu_x = CRe^{0.67}$ と同一のレイノルズ数の依存性を示している¹¹⁾。また最大値は $hx \propto U^{0.5}$ であり、はく離渦より小さいスケールの渦が下壁面上を揺動することによる掻き取り効果によると思われる。すなわち本阿弥ら^{19,20)}が述べているように大きなはく離渦が上、下壁のいずれかに近づくかによって、この小さいスケールの渦が揺動していると考えられる。これは互いに干渉し合わない程の大きな流路を用いて、実験を行い確認すべきと考えている。つぎに下壁面と背壁における最大熱伝達率を代表長さ H にとり、ヌッセルト数 Nu とレイノルズ数 Re との関係を図5に示す。下壁面では

$$Nu = 1.08Re^{0.5} \quad (1)$$

背壁では

$$Nu = 0.30Re^{0.58} \quad (2)$$

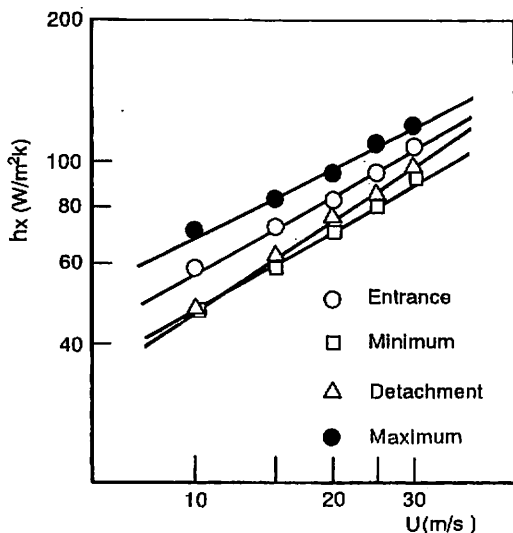


Fig. 4. Dependency of velocity on heat transfer

となる。このレイノルズ数の0.58乗は二次元噴流がはく離後再付着した場合のと同じであり本質的には流れの衝突効果によるものと言える。

つぎに y 方向で局所熱伝達率分布がどのようなになっているかを調べてみよう。各流速に対して $y=0 \sim 200mm$ までの $10mm$ ごとの下壁および背壁および背壁の hx, hz 分布を取った。その代表例として $U=20m/s$ の一定流速とし、 $y=0, 20, 40, 50, 70, 100, 150mm$ および $200mm$ における hx 分布を図6に示す。ここに示していない y の位置も含めて、それらの分布の特徴を述べる。まず $y=0 \sim 30mm$ では徐々に下がり、 $x=245mm$ より僅かに上昇しつつ $y=290mm$ で極大となり、その後 $x=322mm$ で平担となり、以後下降する。 $y=40mm$ では、入口より $x=245mm$ まで一定値を示す。直線流路の流路幅の端となる $y=50mm$ では、入口より下降し $x=70mm$ から $250mm$ の間一定値となる。 $y=40mm$ までとは異なり極大が上流側に移動する。 $y \geq 100mm$ では入口よりはく離位置まではほぼ一定値をもち $x=200mm$ 近傍より急上昇し極大値をうる。局所値の極大は、 $y=0mm$ の $x=292mm$ で得られ、 $hx=100W/m^2K$ である。図6には示しては無いが背壁の hx 分布は、 $y=0 \sim 40mm$ では $z=50mm$ で上下対称、 $z \leq 20$ と $z \geq 80$ での値はほぼ等しい。しかし $y \geq 50mm$ より $z \leq 20mm$ に変化が現れ、上下対称が崩れ始める。これははく離渦が背壁に沿って流出する際に、 $y \geq 5mm$ のように分岐点より下流になると、そのスケールに上下壁

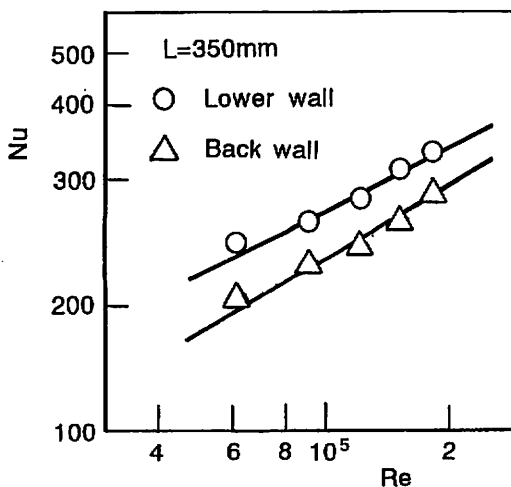


Fig.5. The maximum Nusselt numbers on lower and back walls

で差異があると思われる。

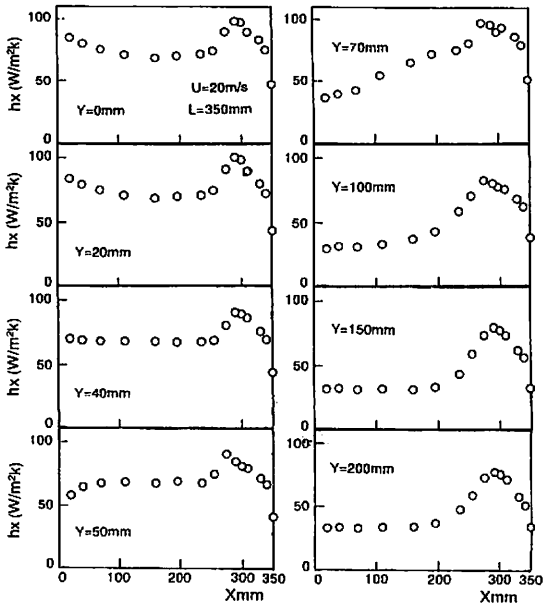


Fig.6. Distribution of the local heat transfer coefficients at various spanwise positions

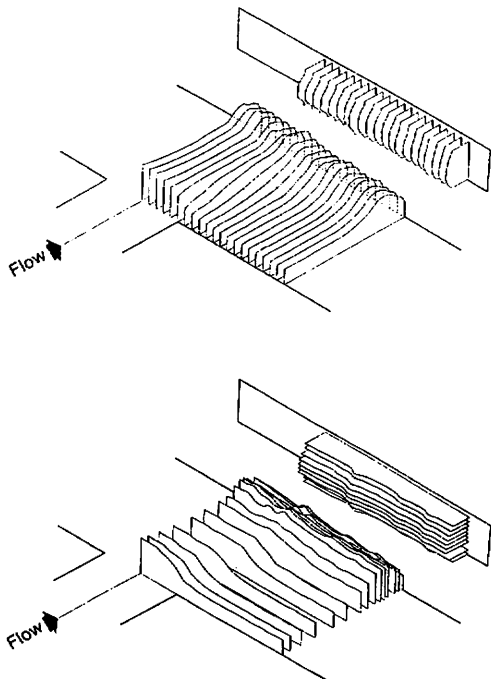


Fig.7. Local heat transfer coefficients on lower and back walls

下壁および背壁の全体的な局所熱伝達率分布が空間的にどのようになっているかを図7に示す。図より入口から背壁に近づくにつれ、局所熱伝達率の減少域が外側に移る。また背壁の h_x の極大値が外側に減少する際の熱伝達率の複雑な分布を引き起こしているが、背壁に沿って場所的にやや周期性のある分布となっており、はく離渦が上下壁面上でそのスケールを交互に変化させて、流出している可能性が示唆される。

8.2 油膜法の可視化による流動特性

流れの可視化を油膜法を用いて試みた。上壁および背壁面の流動模様を図8(a),(b)に示す。入口より流入した流れは広がりながら、かつ中央部の速度を除々に落しながら左右に分岐し始める。対称面を含む中央部の流れは、背壁の存在により圧力勾配が正となるためはく離する。そのはく離線が黒く淀んでいる。また、はく離線は背壁とほぼ平行に左右に延びている。はく離流れが、背壁に衝突し、上方に曲げられはく離渦(順流)を形成し、再び上壁に接する所が白い帯状の下流側の部分であると思われる、その渦が再び上壁から剥がれる所が白い帯状の明確な境界上と思われる。



(a) upper wall

(b) back wall

Fig.8. Flow visualization pattern on upper and back plate (oil film method)

はく離線の下流と白い帯状の上に二つの黒く淀んだ部分があり、その淀んだ部分の中央で流れが二分しているのが分る。このことより、前述のはく離渦とは異なった小さなはく離渦が、二つ存在していると思われる。その二つのうち、上流側のはく離渦は順流であり、下流側のは逆流渦と思われる。はく離渦の再付着点は左右に広がるに従って、上流側に片寄り、出口近傍で下流側に大きな渦を形成している。これは入口側の左右流路端が負圧になり、流れを巻き込む誘引効果によるものと思われる。背壁中央部の流れの可視化については、中心($z=50\text{mm}$)よりやや上方に黒く付着した部分があり、これが上下にはく離渦を抱えた主流が衝突した場所であり、この部分より上下に流れが分岐していることが分かる。また上方に白い線があるが、これははく離渦の再付着点位置であり、この線より上方は中央部の方に流れが存在しており、上壁と背壁の角でのコーナー渦の存在を示している。

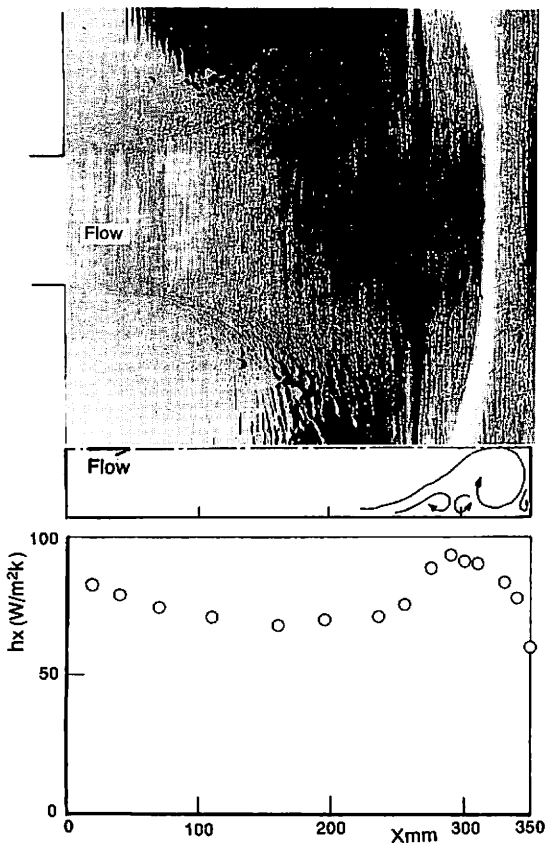


Fig.9. Comparison of the local heat transfer and flow pattern

つぎに可視化による流動特性と局所熱伝達特性との比較を図9に示す。 $y=0\text{mm}$ の対称面における局所熱伝達率分の上昇位置は、はく離線に一致している。前述の熱伝達率へのレイノルズ数の依存性も $Re^{0.67}$ であった。また、極大値は、はく離線と大きめのはく離渦の再付着点(白い帯状の部分)の間にほぼ一致している。極大以降の平坦部は大きめのはく離渦の再付着点に一致している。極大熱伝達率の伝熱機構は、逆流するはく離流が、両はく離渦のスケールの大小関係で揺動しているものと思われ、それに伴って壁面上を掻き取りながら動いていることによると思われる。事実本阿弥ら¹⁹⁾²⁰⁾も両順流うずは互いに吸収されることがないことを述べており、逆流渦は揺動していると思われる。またレイノルズ数の依存性も0.5乗であり、逆流渦の揺動による熱伝達特性と考えて妥当であろう。

4. 結論

三次元はく離流れ場における熱伝達特性に関し、可視化による流動場との関連性に留意し実験を行った。得られた結果はつぎのとおりである。

- 1) 流れは背壁の存在のための逆圧力勾配に支配されており、背壁近くに大きなはく離渦、その上流に別のはく離渦が存在する。
- 2) 局所熱伝達率は背壁近くで極大値をもつ分布を示す。それは両はく離渦の間に小さな渦が存在し、上下壁面上を揺動することに起因する。
- 3) はく離線近傍の熱伝達率はレイノルズ数の2/3乗に依存し、従来のはく離・再付着の伝熱機構と同一の伝熱機構である。
- 4) 背壁の中央部の熱伝達特性は本質的には衝突噴流による伝熱機構と同じである。

参考文献

- 1) A. E. Bergles, Handbook of Heat Transfer Applications (Second Edition), P. 31, McGrawHill, New York (1985).
- 2) A. E. Bergles and P. L. Webb, Augmentation of Convective Heat Transfer, (1971), P. 1, ASME.
- 3) 親川・瀬名波, 日本機械学会論文集, 60-575, B (1994), P. 2532.
- 4) N. Sheriff and Gumley, Int. J. Heat and Mass Transfer, 9, (1966), P. 1297.
- 5) R. L. Webb et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 14, (1971), P. 601.

- 6) 桧和田・ほか 2 名, 日本機械学会論文集, 49-445,B(1980),P.1985.
- 7) 馬淵・ほか 3 名, 日本機械学会論文集, 53-487,B(1987),P.1009.
- 8) 河村・ほか 3 名, 日本機械学会論文集, 50-454,B(1984),P.1566.
- 9) 石井・本阿弥, 日本機械学会論文集, 49-440,B(1983),P.765.
- 10) 石井・本阿弥, 日本機械学会論文集, 51-463,B(1985),P.765.
- 11) 親川・ほか 2 名, 日本機械学会論文集, 60-569,B(1994),P.248.