

# 琉球大学学術リポジトリ

## 流路内壁面近くに置かれた鈍頭物体による伝熱促進

メタデータ	言語: 出版者: 日本機械学会 公開日: 2007-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): Heat Transfer, Heat Transfer Enhancement, Reattachment flow, Large-Scale Vortex, Karman Vortex, Flow Visualization 作成者: 親川, 兼勇, 興梠, 泰明, 屋我, 実, 宮藤, 義孝 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/132">http://hdl.handle.net/20.500.12000/132</a>

## 流路内壁面近くに置かれた鈍頭物体による伝熱促進\*

親川 兼 勇<sup>\*1</sup>, 興 梶 泰 明<sup>\*2</sup>  
屋 我 実<sup>\*1</sup>, 宮 藤 義 孝<sup>\*3</sup>Heat Transfer Enhancement in Duct with Blunt Body  
Inserted Close to Its WallKenyu OYAKAWA<sup>\*1</sup>, Yasuaki KOUROGI,  
Minoru YAGA and Yoshitaka MIYAFUJI<sup>\*\*</sup> Department of Mechanical Systems Engineering, Ryuky University,  
1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903 0213 Japan

This paper shows the effects of clearance length between a body and a duct wall, and duct height on the heat transfer characteristics and flow behavior at downstream region of the body when a blunt body was set in a parallel plate duct with some distance separating it from the duct wall as a turbulence promoter. At the ratio of clearance length to body height,  $C/D = 0.05 \sim 0.1$ , the heat transfer was characterized by the reattachment of shear flow separated from the body. Furthermore, the heat transfer depended on both the reattachment flow and the separation vortex at  $C/D = 0.15 \sim 0.2$ , and the side vortex induced by Karman vortex at  $C/D = 0.25$  and  $0.275$ . The reattachment flow gives a superior effect to enhance heat transfer at low Reynolds number, but at larger Reynolds number, the side vortex induced by Karman vortex becomes more effective to heat transfer enhancement.

**Key Words:** Heat Transfer, Heat Transfer Enhancement, Reattachment flow, Large-Scale Vortex, Karman Vortex, Flow Visualization

## 1. 緒 言

円柱や角柱などの物体を乱流促進体として流路内流れに垂直に置いた場合、物体上端および物体と壁面とのすきまからの強いせん断流が、流れに垂直な渦心をもつ大きなスケールの渦を生成し、熱輸送を活性化させることから、高性能の熱交換器の開発を旨とした伝熱促進法として、数多く研究がなされている<sup>(1)(2)</sup>。乱流促進体は、その形状や位置、さらに配置などの熱伝達率の増大に影響する因子が多いため種々の状態についての伝熱特性の資料が必要となる。親川らは<sup>(3)</sup>、平行平板流路内に円柱を置いた場合の熱伝達の実験を行い、カルマン渦に誘引されて発生する側渦が熱伝達率向上に寄与することを見いだした。鈴木らは<sup>(4)</sup>、角柱を挿入した平行平板間非対称流れの伝熱特性について、実験結果と数値解析との検討を行い、渦や速度分布について解析の妥当性を報告している。Yaoら<sup>(5)</sup>は流路内にブロック比0.2の角柱を置き、壁面と

のすきまを変えて実験を行い、熱伝達機構を詳細に検討している。藤田らは<sup>(6)</sup>、平板境界層内に円柱を平板とのすきまを作って置いた場合に、円柱直径による影響および正方形柱との比較を行い、正方形柱が、円柱よりも背面に生ずる渦が大きくなり流れの加速が強いが、小さなすきま比においては円柱のほうが正方形柱より伝熱促進には有効であると報告している。物体を流路に置く場合、中心に置くと流動損失が著しく増大するため、壁面側にずらして設置する。そのように千鳥状に置くことによって、流動損失の軽減が図られ、さらに物体下流で生成される大きなスケールの渦が壁面上に効果的なく乱れを与えるようである。

本研究は促進体を流路壁面にどれほど近づけて設置できるかを伝熱促進の立場から議論しようとするものである。流路内に二次元の鈍頭物体を置き壁面とのすきまを変化させると、すきまが小さい場合には背面の流れ場はすきまからの流れの影響を受けず、再循環流れが形成される。すきまが大きくなるとすきま流れは壁面に沿って下流に流れるが、背面の流れが減速する際の圧力上昇に伴い壁面上ではく離渦を形成し、同時に再循環流れも存在する。さらにすきまが大きくなると、物体背後でカルマン渦が形成され、それに誘引される形で側渦が形成される場合が考えられる。壁面静

\* 原稿受付 2003年3月20日。

<sup>\*1</sup> 正員、琉球大学工学部(〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町字千原1)。<sup>\*2</sup> 琉球大学大学院。<sup>\*3</sup> 正員、富山工業高等専門学校(〒939-8630 富山市本郷町13)。

E-mail: oyakawa@tec.u-ryuky.ac.jp

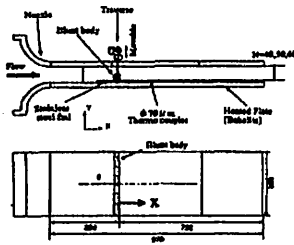


Fig. 1 Schematic diagram of Experimental apparatus

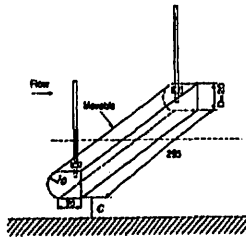
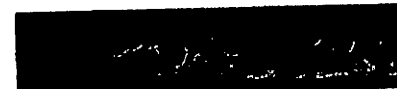


Fig. 2 Blunt body

圧の流れ方向分布、染料を用いた流れのようすの可視化、および壁面熱伝達率の流れ方向分布を測定することですまの違による熱伝達特性とその伝熱機構を調べた。実験はすま  $C$  と物体高さ  $D$  との比  $C/D=0.05\sim 0.275$  の物体が壁面近くに置かれた場合について、平板境界層内では  $C/D$  のみを対象としているが、流路については流路高さが異なると同一の  $C/D$  でも現象が異なるものと思われるので流路高さも3種類に変えて、伝熱促進に及ぼす影響を調べた。

## 2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。流路はスパン長さ300 mmで、高さ  $H=40, 50$  mm および60 mmの3種類で、1/4円弧絞りのノズルを介して空気が流入する。下面のみを伝熱板としており、ベークライト板に厚さ30  $\mu\text{m}$  のステンレスはくを接着し、直流電源を通電し、一様熱流束の加熱をしている。はくの裏面に70  $\mu\text{m}$  の銅-コンスタンタン熱電対を53本はんだ付けしており、流れ方向の壁面温度を測定する。時間平均局所熱伝達率  $h_x$  は熱流束を壁面温度と流路入口温度の差で除すことで算出した。乱流促進体は高さ  $D=20$  mm、長さ30 mmで、図2に示す鈍頭長方体をしており、流路入口より250 mmに後端が位置するようにし、そこを  $X=0$  とした。下面の伝熱面とのすま比  $C/D=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ 、および0.275に設置した。物体の高さ  $D$  を代表長さとし、流路の平

(a)  $C/D=0.05$ (b)  $C/D=0.1$ (c)  $C/D=0.15$ (d)  $C/D=0.2$ (e)  $C/D=0.25$ (f)  $C/D=0.3$ Fig. 3 Visualization of flow patterns for various clearances between body and duct wall ( $D/H=0.4$ )

均流速  $U$  を変化させたレイノルズ数  $Re(=UD/\nu)$  は  $Re=6300\sim 21800$  である。流れのパターンはフルオレセインやローダミンBの染料を用いて別のWater channelを用いて可視化した。

## 3. 実験結果および考察

3.1 染料による可視化 流れの基本パターンを染料で可視化した。結果を図3に示す。 $Re=2000$  であり、空気流れに対して、低い値となっている。レイノルズ数の大小によって生成される渦のスケール、その発生位置は多少異なると考えられ、結果として  $C/D$  に対するフローパターンは空気流と同一にならない可能性もあるが、ここではおもに  $C/D$  によるフローパターンの違いを議論することとする。図3(a), (b)の  $C/D=0.05, 0.1$  では、はく離せん断層で生成された渦は下流方向に進むにつれて成長し、大きなスケール

ルの渦となり先行する渦に合体し、さらに大きな渦に成長し、壁面に付着する。物体と壁面のすきまから流出している染料はよどみ、下流にはあまり流れず、そのために太い白いフルオレセインの流脈が見られるが、すきまからの流れは下流へ影響せず、その後渦は崩壊して下流に流される。図3(c), (d)の  $C/D=0.15, 0.2$  では、 $C/D=0.1$  と同じように物体上端からはく離せん断層で生成された渦は下向きに巻き込みながら流れるが、それとは別にすきまからの流れも存在し、壁面に沿って下流に流れるが、圧力上昇に伴い壁面からだいはく離していき、巻上がり流れとなり、下面にはく離渦が生成される。そのはく離渦は、すきま流れに連動し、生成と下流への移動を繰返し、同時に上端からのせん断層流れに合体し壁面に再付着する。図3(e), (f)の  $C/D=0.25, 0.3$  では鈍頭物体の後端面からカルマン渦が放出され、下面側のカルマン渦の巻上がりにより、はく離渦のような側渦がカルマン渦に同期して発生する。流路内に円柱や角柱を入れた場合、単一円柱を中心部に入れると、ブロックゲージ比  $0.6$  (この場合の  $C/D=0.33$ ) までカルマン渦が形成されるといわれているが、円柱群を千鳥状に置いた場合には<sup>17)</sup>、熱線流速計の出力波形はオフセット比  $H^*=1.3$  ( $C/D=0.15$ ) で規則的な繰返し分布をおもに示し、カルマン渦が放出されていることを示す。 $H^*=1.4$  ( $C/D=0.1$ ) ではときたまカルマン渦が放出されるが、おもに再循環流れとなる。本実験では鈍頭物体の平行部から層流境界層が発達するものとして、すきま流れに対して算出すると、境界層厚さが  $0.6\sim 1.2\text{ mm}$  になるので、実質的にすきまが狭められ、 $C/D=0.25$  でおもにカルマン渦の生成が見られるようである。

**3.2 流れ方向圧力分布** 物体の上流から下流においての流れ方向の圧力分布を図4に示す。 $D/H=0.4$  で、 $C/D=0.1, 0.2, 0.25$  と変化させているが、 $0.1$  と  $0.2$  および  $0.25$  とは分布形状が異なる。 $C/D=0.1$  では分布は物体背面の少し下流の極小値から上昇し、 $X/D=2\sim 4$  で再循環領域による一定圧力となり、その後、漸次出口の大気圧へと回復している。 $C/D=0.2$  および  $0.25$  では背面すぐ下流から急激に圧力は上昇し、大気圧に回復しており、はく離渦、または側渦等が形成される状況にあることが示唆される。物体の設置による流動抵抗がどのような値になるかを物体が設置されていない滑面流路に対応させて、管摩擦係数  $f$  の形で物体の上流と下流との圧力差より求めた。後述される平均ヌセルト数の領域は物体後端部からであり、ここでの流動損失は熱伝達率の平

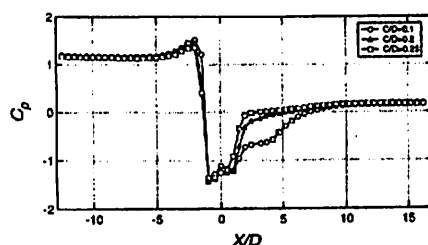


Fig. 4 Variation of streamwise pressure distribution with clearance length ( $D/H=0.4, Re=12500$ )

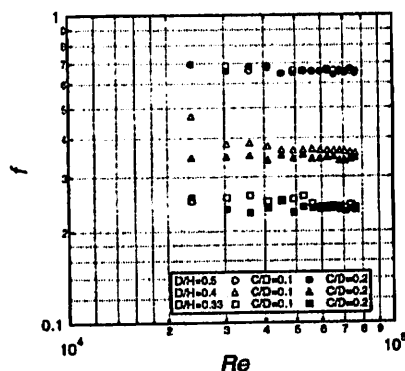


Fig. 5 Relation between  $\lambda$  and  $Re$  varying clearance and duct height

均を求めた領域とは直接的には対応しないが、 $C$  による  $f$  を知るために  $D/H=0.5, 0.4, 0.33$  と流路高さを変えて  $f$  を求めた。 $C/D=0.1$  と  $C/D=0.2$  の場合を図5に示した。いずれも  $H$  が小さくなると  $f$  は大きく、 $D/H=0.5$  は  $D/H=0.4$  の約2倍となる。

**3.3 流れ方向局所熱伝達率分布特性** 流れ方向局所熱伝達率分布の流速による特性を見てみる。流路高さ  $H$  に対して  $C/D$  を変えたときの局所熱伝達率のレイノルズ数に対する変化を図6(a), (b)および図6(c)に示す。分布は流路入口で急増の特性を示しながら下降し、鈍頭物体の上流  $X/D=-3$  で急上昇する。その後、すきまの大きさにより異なる分布モードをとり、下流で極大値をとる分布となる。まず、図6(a)の  $D/H=0.4, C/D=0.05$  の熱伝達率は流路入口より急増域における分布を示し鈍頭物体直前で急激に上昇し、すきま流れが減速することによって減少し、物体前後の位置で極小値をとる。その後、 $X/D=3\sim 4$  で最大をとり、再び緩やかに減少する。最大値の位置は鈍頭物体上端からはく離したせん断流の再付着点で起き、流れの揺動のため、分布は丸みを帯びた形状に

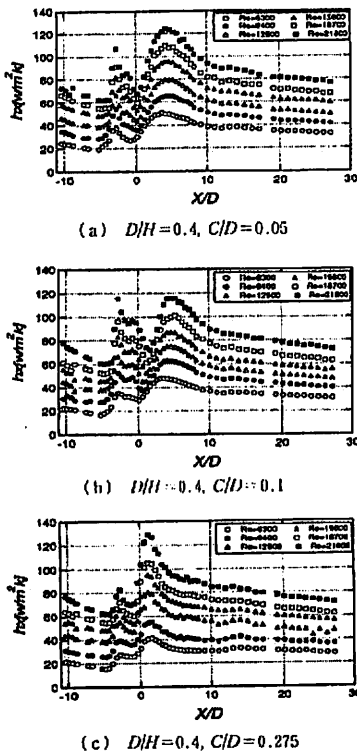


Fig. 6 Distribution of streamwise local heat transfer coefficients for various Reynolds numbers

なる。この流れのパターンは、後向きステップ流れの熱伝達特性と同様である。

$Re=6300\sim 21800$ の範囲では、分布はほぼ同じ形状をとっているが、最大値の位置が流速とともにわずかに下流にずれる。図6(b)の $D/H=0.4, C/D=0.1$ においても、図6(a)の場合と同じような分布をたどっている。物体直前で急激な熱伝達率の上昇を伴い、物体下流で極小値をとった後、 $X/D=4\sim 5$ で最大となる。

図6(a)と比較すると分布形状は似通っているが、最大熱伝達率は、低い値を示している。その最大値の位置はレイノルズ数とともにわずかに下流にずれる。

図6(c)の $D/H=0.4, C/D=0.275$ になると、カルマン渦が放出される。下面側のカルマン渦の巻上がりに誘引され、側渦が発生する。熱伝達率分布は、側渦の発生箇所と思われる $X/D=1\sim 2$ の位置で最大を示しており、最大値を表す分布の形状は、図6(a)や図6(b)とは違い、丸みを帯びておらず、かつ $Re$ の増加に伴い鋭くなる。最大値を示す位置は $Re$ が増加して

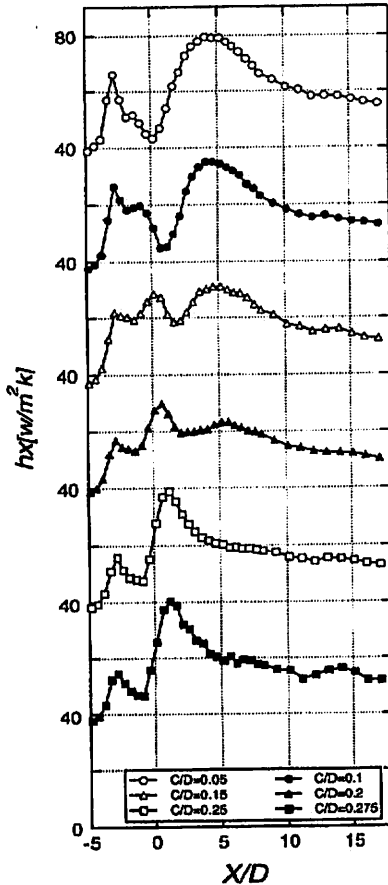


Fig. 7 Variation of local heat transfer coefficients with clearance length ( $D/H=0.4, Re=12500$ )

も変化しない。次にすきまを変えた場合の局所熱伝達率分布の変化のようすを図7に示す。流路高さ $D/H=0.4$ においてすきまを $C/D=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ それに $0.275$ と順次大きくした場合、分布は鈍頭物体の先端付近で急激に上昇し、後端で減少し再び下流で大きな弧を描いた最大値を示した後に緩やかに減少する。少しすきまが大きくなると、すきま内にわずかなピークが現れ、さらに後端部より下流で最小値を取り、再び最大値を取り、前述の分布と本質的に変わらない。すきまが大きくなると、後端部で極大値を取り、その後、極小となり、下流で緩やかな分布を示す。すきまがそれより大きくなると、後端部での極大値は下流に少しずれ、値が大きくなる。さらにすきまを大きくしたら、先の後端部直後での極大値はさらに下流に移動し、最大値となり、その後単純に減少

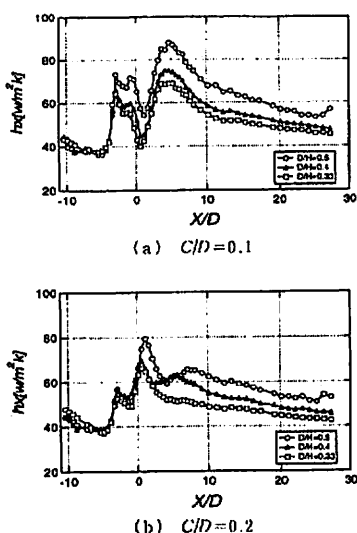


Fig. 8 Variation of local heat transfer coefficients with duct height ( $Re=12500$ )

する。このようにすきまを順次大きくして分布の変化を見てみると、すきまによって分布のパターンが大きく三つに分けられる。まず、すきまの小さい  $C/D=0.05, 0.1$  では、物体の後端で最小値、 $X/D=4\sim 5$  で最大となり、その後なだらかに減少している。両者の熱伝達率に差が見られるものの、この分布形状は、はく離した後再付着する流れの場合に現れるものであり、すきま流れは物体背面の流れに影響を与えず、再付着による伝熱がおもである。 $C/D=0.15, 0.2$  では再付着による伝熱特性が残っているものの、物体後端部で熱伝達率が上昇し、極大値を示しており、すきまからの流れは背面に流入している。後端部で熱伝達率が增大するのは、流れの可視化で考察したようにはく離渦の生成、その移動に伴うものであろう。特に  $C/D=0.2$  では、ときどきカルマン渦が放出される可能性もある。 $C/D=0.25$  では  $X/D=1$  で熱伝達率は最大をとり、その後は他に比べて急に下降し、再付着による極大値をもたない。この状態はほとんどカルマン渦が放出されており、強い側渦による伝熱促進が図られている。

最後に、流路高さによる熱伝達特性の影響を考察しよう。平板境界層内に円柱を置く場合には、流れ場および熱伝達特性は円柱径とすきまとの比のみのパラメータで決まったが、流路内に置いた場合にはその流路高さがもう一つの因子となろう。流路高さ  $D/H=0.5, 0.4, 0.33$  の3種類のそれぞれの  $C/D=0.1, 0.2$

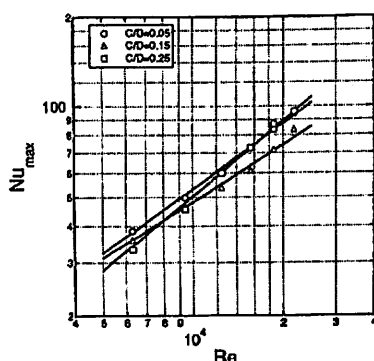


Fig. 9 Relation between  $Nu_{max}$  and  $Re$  varying clearance length ( $D/H=0.4$ )

の流れ方向局所熱伝達率分布を図8(a), (b)に示す。 $C/D=0.1$ の分布は図6に示したように形状は再付着による特徴を示し、 $H$ によらず、ほぼ同じであり、 $D/H=0.33, 0.4, 0.5$ と流路高さが狭まるにつれて、熱伝達率は上昇する傾向にある。 $C/D=0.2$ の熱伝達率分布は、鈍頭物体のすぐ下流  $X/D=1$ で最大をとり、その後はそれぞれ異なる分布形をたどりながら減少している。その中でも特に  $D/H=0.5, 0.4$ は、最大値を示した後に再び山なりの分布となる。 $D/H=0.33$ のとき、他と異なり、分布は  $X/D < 1$ で最大となり、その後単調に減少している。これは、カルマン渦の誘引による側渦の発生に起因していると思われ、 $H$ が大きくなると、同一の  $C/D$ でもカルマン渦が放出される。先に、流路内に千鳥状に円柱を置いた場合に、中心部に置いた場合のすきまに比べて小さいすきまでもカルマン渦が放出されることと同意である。すなわち流路高さが減少すると、 $C/D=0.1$ では全体的に熱伝達率の上昇が見られたが分布形状は変わらず、一方、 $C/D=0.2$ では二つの流動パターンが混在し、熱伝達率の上昇とともに再付着流れとはく離渦による分布形状を示す。

**3・4 伝熱特性** 伝熱特性の特徴を表すものとして局所熱伝達率分布の最大値、および流れ方向平均の値とレイノルズ数との関係を見てみる。図9に流路高さ  $D/H=0.4$ で  $C/D=0.05\sim 0.275$ の最大熱伝達率  $h_{max}$ と物体高さ  $D$ を代表長さとする最大ヌッセルト数  $Nu_{max}(=h_{max}D/\lambda)$ とレイノルズ数  $Re$ の関係を示す。なお、分布は見やすくするために、 $C/D=0.05, 0.15$ および  $0.25$ をそれぞれの代表的なものとして示した。0.05, 0.1, 0.15は再付着した場合の最大値、0.2, 0.25, および0.275は物体背後で最大となる値の

Table 1 Relation between  $Nu_{max}$  and  $Re$  varying clearance and duct height

		$Nu_{max}=c Re^m$		$Nu_{10}=c' Re^{m'}$	
		c	m	c'	m'
D/H=0.5	C/D=0.1	0.061	0.74	0.04	0.77
	C/D=0.2	0.025	0.83	0.049	0.74
D/H=0.4	C/D=0.05	0.07	0.72	0.072	0.7
	C/D=0.1	0.065	0.72	0.088	0.67
	C/D=0.15	0.145	0.63	0.09	0.67
	C/D=0.2	0.015	0.87	0.03	0.78
	C/D=0.25	0.024	0.83	0.021	0.82
	C/D=0.275	0.014	0.88	0.011	0.89
D/H=0.33	C/D=0.1	0.074	0.7	0.084	0.67
	C/D=0.2	0.015	0.87	0.023	0.8

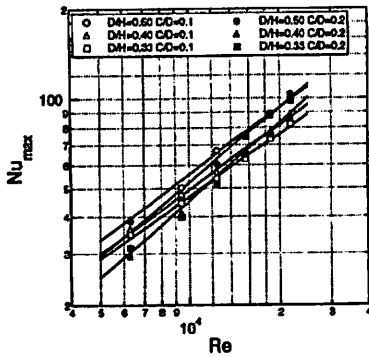


Fig. 10 Relation between  $Nu_{max}$  and  $Re$  varying clearance and duct height

最大ヌッセルト数である。  $Re$  に対する  $Nu_{max}$  は  $C/D=0.05$  の場合が大きく、  $Re$  のべき数は  $0.72$  であり、はく離・再付着領域での熱伝達特性  $Nu_{max}=cRe^{0.67}$  に近い。  $C/D=0.15$  は再付着と下壁面上のはく離渦による熱伝達率の増大はほぼ同じであり、  $Re$  の増大とともに両効果が相殺された形となり、増大率が減少している。さらに、  $C/D=0.25$  では  $Nu_{max}$  は  $Re$  の増大とともに大きくなり、  $Re=20000$  では  $C/D=0.05$  より大きな値となる。図6からも知られるように、  $Re$  とともに  $Nu_{max}$  は増大する傾向にあり、  $Re^{0.63}$  となり、カルマン渦に同期する側渦の Sweep 効果によると考える。これらの  $Nu_{max}$  と  $Re$  との関

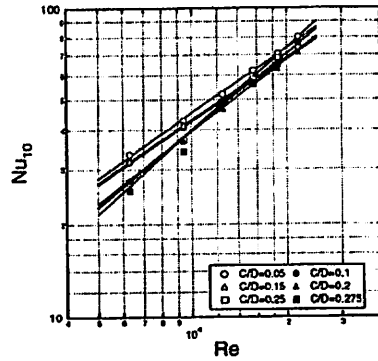


Fig. 11 Relation between  $Nu_{10}$  and  $Re$  varying clearance length ( $D/H=0.4$ )

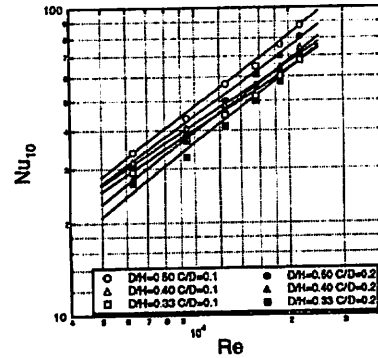


Fig. 12 Relation between  $Nu_{10}$  and  $Re$  varying clearance and duct height

係を  $Nu_{max}=cRe^m$  として  $c$  と  $m$  の値を表1にまとめた。流路高さ  $D/H=0.5, 0.4$  および  $0.33$  に対して  $C/D=0.1$  と  $0.2$  の場合の  $Nu_{max}$  も図10に示した。それらの  $Nu_{max}$  は  $H$  が小さいほど大きい、  $C/D=0.1$  と  $C/D=0.2$  ではレイノルズ数の依存性が異なり、  $C/D=0.1$  では  $Re^{0.7}$  であるのに対して  $C/D=0.2$  では、特に  $D/H=0.4, 0.33$  で  $Re^{0.87}$  と大きくなり、低レイノルズ数では  $C/D=0.1$  のほうが大きな  $Nu_{max}$  を示すものの、レイノルズ数が大きくなると  $C/D=0.2$  の場合が大きくなる傾向にある。次に下流の伝熱促進量を知るために流れ方向局所熱伝達率を物体後端の  $X/D=0\sim 10$  で平均した平均ヌッセルト数  $Nu_{10}$  を求めた。  $D/H=0.4$  に対して、  $Re$  に対する  $Nu_{10}$  を図11に示した。  $C/D=0.05\sim 0.275$  に変えているが  $Nu_{10}$  は  $C/D=0.05, 0.1$  および  $0.15$  が高く、  $C/D=0.2, 0.25, 0.275$  は低い。特に  $Re$  が小さい場合にその傾向は顕著となる。  $C/D=0.05, 0.1$  および  $0.15$  が

再付着点での熱伝達率特性がおもで、レイノルズ数の依存性が  $Re^{0.67-0.7}$  であるのに対して、 $C/D=0.2$ ,  $0.25$ ,  $0.275$  は  $Re^{0.78-0.89}$  と大きくなっており、 $Re$  の増大とともに、再付着の場合の特性に見られる物体後端部で熱伝達率が劣化する領域が軽減することが考えられる。

$C/D=0.15$  や  $C/D=0.2$  は再付着またははく離渦のいずれかに偏った場合の特性である。 $H$  の影響を見てみると図 12 に示しているように  $H$  が小さいほど  $Nu_{10}$  は増大している。 $C/D=0.1$  では  $Nu_{10}=Re^{0.67-0.7}$  で、再付着の効果がおもであり、 $C/D=0.2$  では特に  $D/H=0.4$ ,  $0.33$  でははく離渦による特性と考えられる。これらの  $Nu_{10}$  と  $Re$  との関係も最大ヌセルト数と同様に  $Nu_{10}=c' Re^{m'}$  の形で、それぞれのパラメータについて  $c'$ ,  $m'$  を表 1 に示した。

#### 4. 結 言

(1) 局所熱伝達率はレイノルズ数にほぼ相似的に増大しているが、 $C/D$  が小さい再付着での最大熱伝達率の位置はレイノルズ数とともに下流にずれる。 $C/D$  が大きい場合はレイノルズ数によらず同位置にある。

(2) 伝熱特性はすきまの大きさによってまったく異なる。 $C/D=0.05$ ,  $0.1$  ははく離した流れの再付着、 $C/D=0.15$ ,  $0.2$  ははく離渦と再付着が混在しており、さらに  $C/D=0.25$ ,  $0.275$  はカルマン渦に誘引されて

生成される側渦に依存している。

(3)  $C/D$ ,  $H$  がそれぞれ小さいほど熱伝達率は大きくなり、 $H$  が小さいと、大きな  $C/D$  に対応した伝熱現象を示す。

(4) 低いレイノルズ数では流れの再付着の伝熱促進効果が、高いレイノルズ数ではカルマン渦に誘引される側渦の効果が優れる傾向にある。

#### 文 献

- (1) Oyakawa, K., ほか 5 名, Study on Time-spatial Characteristics of Infra-red Images and Dye Flow *Proc. 9th. Int. Symp. Flow Visualiz.* (2000), CD-ROM, paper no. 233.
- (2) 親川兼男・ほか 2 名, 流路内熱伝達促進におよぼす乱流促進体形状の影響, 機論, 52-474, B (1986), 860-865.
- (3) 親川兼男・馬淵幾夫, 平行平板流路内に円柱を置いた場合の流動および壁面熱伝達, 機論, 47-414, B (1981), 308-316.
- (4) 鈴木洋・ほか 3 名, 角柱を挿入した平行平板間非対称流れの伝熱特性, 機論, 59-561, B (1993), 264-269.
- (5) Yao, M., ほか 2 名, Flow visualization and heat transfer experiments in a turbulent channel flow obstructed with an inserted square rod, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 16 (1995), 389-397.
- (6) 藤田秀臣・ほか 2 名, 壁面近傍におかれた二次元円柱が平板強制対流伝達におよぼす影響, 機論, 第 2 部, 42-361 (1976), 2828-2835.
- (7) 親川兼男・馬淵幾夫, 平行平板流路内に千鳥状に円柱を置いた場合の壁面熱伝達, 機論, 48-432, B (1981), 1509-1519.