



Title	流路内熱伝達促進におよぼす乱流促進体形状の影響
Author(s)	親川, 兼勇; 新里, 隆男; 馬淵, 幾夫
Citation	日本機械学会論文集. B編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B, 52(474): 860-865
Issue Date	1986-02-25
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/198
Rights	Copyright (c) 1986 日本機械学会

流路内熱伝達促進におよぼす乱流促進体形状の影響*

親川 兼勇**, 新里 隆男**, 馬 渕 幾 夫***

Effect on Heat Transfer Augmentation by Some Geometric Shapes of
a Turbulence Promoter in a Rectangular Duct

by Kenyu OYAKAWA, Takao SHINZATO, and Ikuo MABUCHI

This paper investigates how the local heat transfer coefficient is affected by geometric shape and the clearance "C", when turbulence promoters of various types (blockage ratio $D/2H=0.22$) are set in staggered arrangement in a rectangular duct in order to augment heat transfer from the wall. The distribution of local heat transfer coefficients depends on the clearance "C", which can be further differentiated by the presence or absence of the Karman vortex shedding. The degree of augmentation is also analysed, taking account of the pressure loss. It was found that the performance ratio η (the ratio of average heat transfer for the present system to that for a smooth duct under the condition of equivalent pumping power) is larger than unity for all types, when the range of clearance "C" is smaller than 3 mm.

Key Words: Convective Heat Transfer, Heat Transfer Augmentation, Turbulence-Promoter, Karman Vortex, Reattachment, Pressure Drop, Duct Flow

1. 結 言

伝熱促進を図るため流路内に種々の形状の乱流促進体をそう入する方法がある。著者らは流路内に円柱列を千鳥状に置いた場合の熱伝達促進に関する実験的研究⁽¹⁾を行った。乱流促進体はその形状、および配置などパラメータが多く、最適な促進体の形状、配列を決定し、実際の応用に資するためには基礎的資料の蓄積が必要である。

本実験は既報⁽¹⁾と同様促進体を千鳥状に配置し、対向壁側の促進体からの効果を期待するものである。長谷川ら⁽²⁾、一言ら⁽³⁾は平行平板流路面に設置された種々の形状の突起が対向壁面の熱伝達向上に有効なことを示している。また藤田ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は乱流境界層内に二次元物体を伝熱面から浮かせ、すきまを設けた場合について系統的実験を行い、とくに傾斜角45°の帯板をそう入した場合、圧力損失の点から熱伝達向上に有効であると述べている。しかし単一板であり、流路内にそう入された複数列の場合とは局所熱伝達特性が異なる

であろう。

本実験は乱流促進体として垂直帯板、傾斜板および支持平行部をもつ形状について、促進体と伝熱面とのすきまを種々変化させ、流路壁局所熱伝達率、抵抗係数の測定を行い、熱的性能比の比較・検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

流路系は吹出し形で、流路は高さ $2H=50$ mm, 幅 300 mm の長方形断面で、全長 4 800 mm である。入口から 1 800 mm の速度助走区間をとり、ついで 1 800 mm の伝熱面、その下流に後続ダクトが設けられている。最初の促進体は加熱開始点から 570 mm にそう入した。この断面で温度場はほぼ発達している。本実験では促進体間隔 P は 80 mm で、個数は 9 本である。促進体の高さ D は 11 mm とした。促進体の流路ブロック比 $D/2H$ ($2H$: 流路幅) は 0.22 である。実験は空気で行っており、流路レイノルズ数 $R_o = \bar{U} \cdot 4H/\nu$ (\bar{U} : 平均速度, ν : 空気の動粘性係数) は $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ の範囲である。

促進体はアルミニウム板製で、その配置、幾何学的形状、ならびに寸法を図 1 に示す。各形状の促進体に対し、壁面と促進体とのすきま C を 1 mm 間隔で 5 mm まで変化させた。上壁側の促進体には奇数番号、

* 昭和 60 年 11 月 14 日 第 934 回講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 4 月 24 日。

** 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原 1)。

*** 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)。

下壁側の促進体には偶数番号を付す。また x 座標は第 1 促進体前縁を原点とする。促進体そう入による圧力損失 ΔP は助走域、下流流路での水力圧力勾配線を探り、その圧力差から求めた。伝熱面は上下壁とも厚さ $30\ \mu\text{m}$ のステンレスはく ($300\ \text{mm} \times 1800\ \text{mm}$) を接着し、直流加熱による表面熱流束 q_w 一定とした。壁面温度 t_{wx} の測定は下壁面で行い、流路スパン中心線の上に 91 点ステンレスはく裏面にはんだ付けした $\phi 70\ \mu\text{m}$ の Cu-Co 熱電対から求めた。流体のバルク温度 t_{bx} は流路入口温度を測定し、これに測定位置までの伝熱面の総発熱量に相当する温度上昇を加えて求め、局所熱伝達率 $h_x = q_w / (t_{wx} - t_{bx})$ を求めた。なお $(t_{wx} - t_{bx})$ はほぼ $3 \sim 15^\circ\text{C}$ である。さらに流れの可視化をフルオレセインをトレーサとして水路で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 局所熱伝達率 まず千鳥配置の有効性を検討する。図 2 は千鳥配置と両側対に配置した場合の局所熱伝達率分布の比較を示す。対配列の分布は第 3 促進体以降各 P 間の繰返しとなり、千鳥配列では第 4 促進体以降各 $2P$ 間で同じ分布の繰返しとなる。第 4 促進体から第 8 促進体までの局所熱伝達率分布の平均値を平均熱伝達率 \bar{h}_x とし、それぞれの \bar{h}_x を比較すると、 $Re = 3.1 \times 10^4$ の場合、対配列の \bar{h}_x は $62.9\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ で千鳥配置の 1.18 倍となる。しかし抵抗係数 $\lambda (\lambda = \Delta P / \{(\Delta x/d_e)\}[(1/2)\rho U^2])$, $\Delta x = P \times 9$, $d_e =$

$4H$ (定義) は 1.505 で千鳥配列のほぼ 3 倍であり、後述の熱的性能比の点から有利ではない。

つぎに対壁側の促進体がある場合 (千鳥配置) とない場合の比較を図 3 に示す。図 3 中 \circ の千鳥配置の局所熱伝達率 h_x はない場合の促進体側の値 (図中 \bullet 印) より大きい。上下の両伝熱面については千鳥配置とない場合 (上面 Δ 印と下面 \bullet 印の平均値) とでは、滑面流路の平均熱伝達率 h_m との比 \bar{h}_x/h_m はそれぞれ 3.0, 1.7 である。なお図 3 中 Δ 印は促進体の対向壁の結果で $\bar{h}_x/h_m = 1.3$ であり、本実験のように低ブロック比 (0.22) の場合有効とはいえない。以下千鳥配列について考える。図 1 に示す $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の促進体 (翼形促進体の基本形状) そう入の場合について、第 4 促進体以降の局所熱伝達率分布の比較を図 4 (a), (b) に示す。図 4 (a) は $Re = 6.2 \times 10^4$, $C = 2\ \text{mm}$ の結果である。分布は促進体直下ですさまじい流れによるピーク①を、促進体後流の再付着効果と対壁側促進体の効果によるピーク②をもつ⁽¹⁾。ただ $\theta = 30^\circ$ では傾斜板の長さが長いので、ピーク①が下流にずれ、②のピークは明確に現れない。 θ の増加とともにピーク①は増大し、かつ上流側に移行し、ピーク②と明確に区別される。図 4 (b) は $Re = 3.1 \times 10^4$ の結果で Re を変えても分布は相似である。

つぎに $\theta = 90^\circ$ とし、平行部のない垂直帯板、平行部の位置が異なる促進体の局所熱伝達率分布を図 5 に

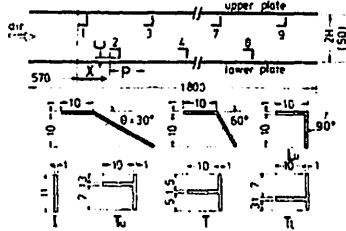


図 1 促進体配置、形状および諸寸法

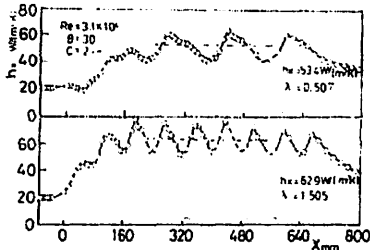


図 2 千鳥配置と両側対に配置した場合の局所熱伝達率分布

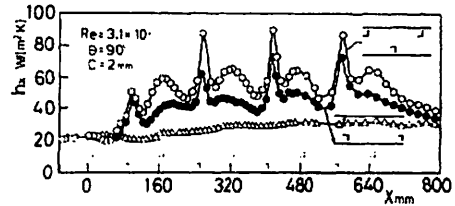


図 3 対壁側促進体の効果

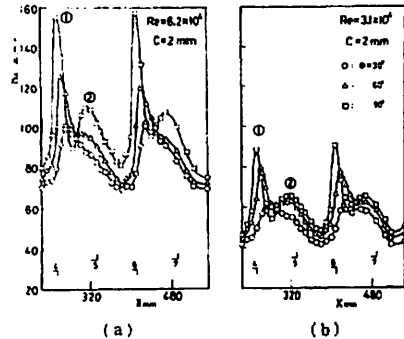
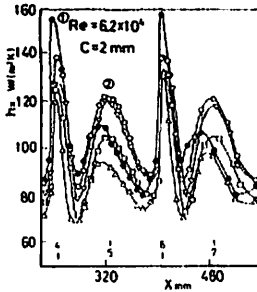


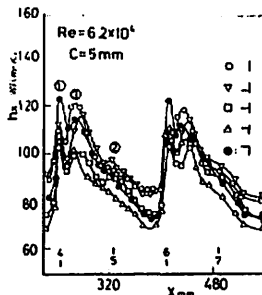
図 4 角度 θ を変化させた場合の局所熱伝達率分布

示す。図5(a)は $C=2\text{ mm}$ 、図5(b)は $C=5\text{ mm}$ の場合で、 $Re=6.2 \times 10^4$ の結果である。前者は促進体下流で再付着がある場合、後者は促進体よりカルマン渦が放出される場合の代表的分布⁽¹⁾である。すなわち前者ではピーク①およびピーク②が明確である。後者ではピーク①およびカルマン渦放出による壁面に沿う流れの巻き上げに起因するピーク③⁽¹⁾が出現し、再付着効果および対壁側促進体の効果が低減し、ピーク②が目立たなくなる分布である。まず図5(a)について述べる。ピーク①は L_c 形(以下促進体形状を図1に示される記号I, T_u , T, T_l と呼ぶ)の場合が最大で、I, T, T_l 形の順となる。すなわち、平行部位置が壁面に近く、垂直部が主流に突出した場合がピーク①は顕著になる。同時にピーク②についてもI, T_u , T, T_l 形の順となり、主流部に突出させた場合に後流渦は強く、対壁側の促進体の効果も大きくなることを示している。 L_c 形は若干性状を異にし、ピーク①の増大に比べて、ピーク②はあまり増大していない。この場合ピーク②の位置は他の形状の促進体の場合より上流側に移動し、かつ対壁側の効果も低下している。これは後流渦域が他の形状の場合に比べて小さくなっているためと考えられる。当然ながら T_u は L_c 形の特性に近い。つぎに図5(b)について述べる。これはカルマン渦

放出のある場合の代表例で、ピーク①、②のほかピーク③の存在が特徴的である。この場合ピーク②はピーク③に比べてピーク値はあまり目立たなくなることが知れる。ピーク③はI形が最も顕著で、T, L_c の順になり、T, T_u 形のピーク値は低い。この場合カルマン渦強さの低下が予想されるからである。以上は $C=2, 5\text{ mm}$ を代表例にとったが、つぎにすきま C を変化させた場合の局所熱伝達率分布をI形(T_l 形も類似の性状を示す)およびT形を代表例として図6(a), (b)に示す。I形の場合(図6(a)), $C=1, 2, 3\text{ mm}$ の分布と $C=4, 5\text{ mm}$ の分布とは明らかに異なり、カルマン渦抑制限界はピーク②の変化から $C \approx 4\text{ mm}$ と推測される。T形の場合(図6(b)), $C=3\text{ mm}$ のピーク②は $C=4, 5\text{ mm}$ とほぼ等しく、渦抑制限界は $C \approx 3\text{ mm}$ に近いものと推測される。このカルマン渦抑制限界のすきま C の変化はI形の後流渦がT形に比べて大きいためと考えられる。つぎにすべての形状について $C=1\text{ mm}$ のとき、ピーク①、②は C の大きい場合に比べて大きな値をとり、同時に極小値も顕著な分布となっている。すなわち、流れ方向の壁面温度の変化の振幅が C が小さい場合大きくなる。なお促進体直前の極小値は C によりあまり変化しない。そこで平均熱伝達率 \bar{h}_x に対する h_x の比の x 方向変化に対する C の影響をI形を例にとり図7に示す。 $C=1\text{ mm}$ の場

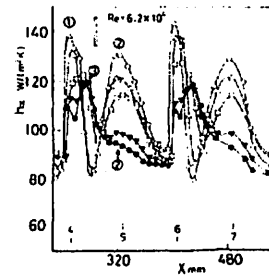


(a)

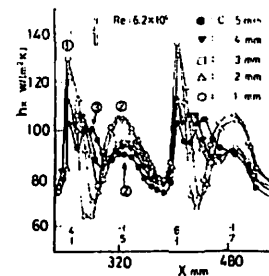


(b)

図5 形状による局所熱伝達率分布



(a)



(b)

図6 すきまCによる局所熱伝達率分布

合、 h_x/\bar{h}_x の分布は0.7~1.3にまたがり、不均一性が目立つ。また $C=4\text{ mm}$ と 5 mm では $C=4\text{ mm}$ の場合がより均一である。最も均一な分布が得られるのはカルマン渦抑制限界すきまに近い場合（上述のようにI形では $C\sim 4\text{ mm}$ ）であろうと推論される。なお乱流境界層内に垂直帯板をそう入した場合、渦抑制限界のすきまが円柱のそれより大きいことがEveritt⁽⁴⁾によって明らかにされている。したがってこの事実は流路内におかれた促進体の場合も本質的に変わらないことがわかる。

3.2 流れの可視化 図8は $\theta=90^\circ$ の促進体を

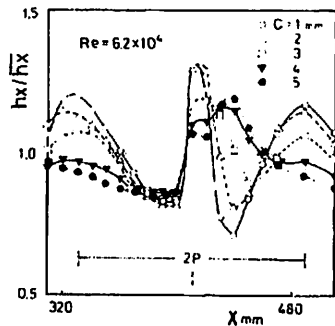


図7 すきまCに対する h_x/\bar{h}_x の分布

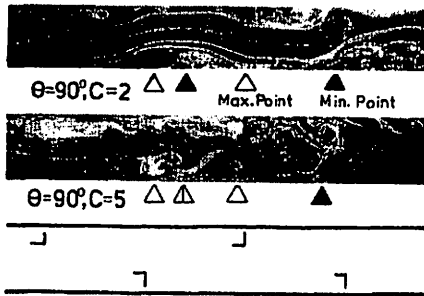


図8 すきまによるフローパターンの変化

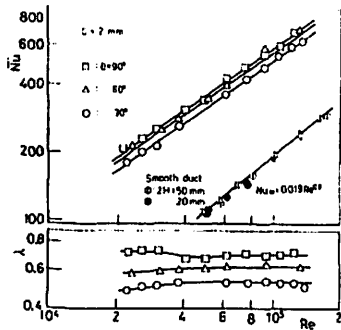


図9 θ による平均ヌセルト数と抵抗係数

$C=2\text{ mm}$ と $C=5\text{ mm}$ に配置した場合のフローパターンを示す。促進体は4個で、図8中に h_x の極大・極小値の位置が示されている。 $C=2\text{ mm}$ の場合、促進体背面で停滞せず、その下流に再循環流れが形成されている。停滞せずの後端で h_x は極小となり、再循環流れの後端は対壁側にある促進体の影響をうけ、壁面上に再付着し、 h_x は極大となっている。このようにすきま流れは停滞せず後端で促進体下端からはく離せん断層に巻き込まれ、下流まで壁面に沿って流れず促進体の主流側はく離せん断層の再付着を妨げない。一方 $C=5\text{ mm}$ の場合カルマン渦が放出され、図8中の Δ 印の位置で渦の巻き込みに連動する壁面渦によるかく乱効果で h_x の極大が出現する。なお可視化実験は $Re=2600$ で行っており、空気流の Re に比べて小さいが、既報⁽¹⁾において円柱列後流の可視化のフローパターンを熱線風速計による空気流の速度変動の出力波形から検討した結果、カルマン渦放出およびその抑制限界比などよく対応することを確認している。

3.3 平均ヌセルト数および抵抗係数 第4促進体から第8促進体までの h_x が繰返し分布となる区間から平均熱伝達率 \bar{h}_x を求め、平均ヌセルト数 $\bar{N}_u = \bar{h}_x \cdot 4H/k$ (k : 空気熱伝導率) をうる。図9は $\theta=30, 60, 90^\circ$ に対する \bar{N}_u, λ の結果 ($C=2\text{ mm}$) を示す。 \bar{N}_u, λ の大きさは $\theta=90, 60, 30^\circ$ の順となる。 \bar{N}_u は Re のほぼ0.7乗に比例し、滑面流路の0.8乗に近い値をとり、 \bar{N}_u/\bar{N}_{u0} (\bar{N}_{u0} : 滑面流路の平均ヌセルト数) は実験の Re 範囲で、約3倍である。一方 λ は Re によらず

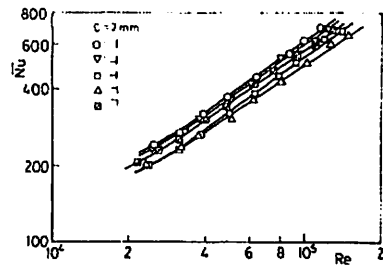


図10 形状による平均ヌセルト数

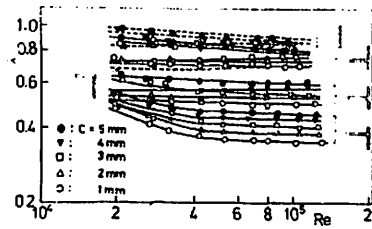


図11 λ - Re 線図

ほぼ一定値となる。さて前述のように、 h_x の分布はCの変化により大きく変化する。しかし、 $\overline{h_x}$ は再付着流れとカルマン渦放出の場合とで差があるが、一般にCによる変化はあまり大きくない。そこでC=2mmの場合に限定し各形状による \overline{Nu} の比較を行う(図10)。 \overline{Nu} は図5(a)で示されるピーク②の大きさの順になっており、この再付着流れではピーク②が支配的であることがわかる。 R_o の依存性は形状により多少の差はあるがあまり変化はない。なお R_o のべき指数が滑面の値よりわずかに小さいのは、上述のように乱れ発生が主として流れのはく離・再付着によるため、例えば多孔板形リブを用いた粗面に対する棚沢ら¹⁷⁾の結果も同様の傾向にある。つぎに各形状に対する λ の結果を図11に示す。図11に明らかのように λ は一般にCにより差異が生ずる。とくにT形、 T_u 形はCによる依存性が強い。一般にすきまの増加とともに λ は増加する傾向を示す。ただし L_u 形は例外で図11中点線で示すようにCにほとんどよらない。また平行部が壁面側にある T_u 形が、主流側にある T_1 形より λ は大きく、T形はその中間の値をとる。このように平行部からの突出は流動抵抗に強く作用することが知れる。なお λ は本実験の R_o 範囲では R_o によらずほぼ一定値を示すが、 T_u 形では低 R_o 域で λ の増加がみられる。

3.4 熱的性能比 熱交換器の設計目的により種々の熱的評価法⁽⁶⁾が考えられるが、ここではポンプ動力、伝熱面積が一定という条件で、促進体その入による熱伝達増加比を求める。促進体をそ入した場合の R_o と滑面の R_{o0} との関係は、この拘束条件から

$$R_{o0} = R_o (\lambda / \lambda_0)^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

λ_0 は滑面の摩擦抵抗係数で、 $\lambda_0 = 0.3164 R_{o0}^{-1/4}$ を上式に代入して

$$R_{o0} = (\lambda R_o^3 / 0.3164)^{1/2.75}$$

となる。この R_{o0} に対する Nu_{o0} を求め、熱伝達率増加比

$$\eta = \overline{h_x} / h_{x0} = \overline{Nu} / Nu_{o0} \dots\dots\dots (2)$$

を算出した。

まず千鳥配列と両側対配列の場合(図2)の比較を行う。縦軸は η 、横軸は棚沢ら¹⁷⁾にならない $\sqrt{\lambda} R_o$ で表した結果を図12に示す。 $\theta = 30^\circ$ 、C=2mmの結果である。千鳥配列(○印)は対配置(●印)に比べて η は大きい。 η の $\sqrt{\lambda} R_o$ による変化の傾向に差異がみられ、 $\sqrt{\lambda} R_o$ の小さい領域では両者の差は小さくなる傾向を示す。つぎに $\theta = 30^\circ$ で傾斜板を主流に傾けた反転促進体との比較を行う。反転形(△印)は標準形(○印)に比べて、 η は小さく有効でないことがわかる。さらに θ の変化については、 $\theta = 60^\circ$ の η が最も大きく、ついで $\theta = 90^\circ$ が大きく、 $\theta = 30^\circ$ ではこれらに比べて η は小さい。すなわち最適角度が存在する $\theta = 60^\circ$ の場

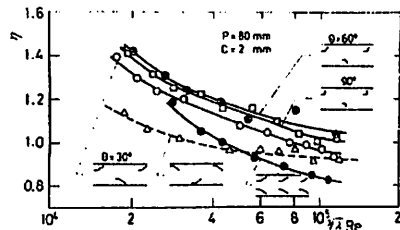


図12 η - R_o 線図(角度、配置の影響)

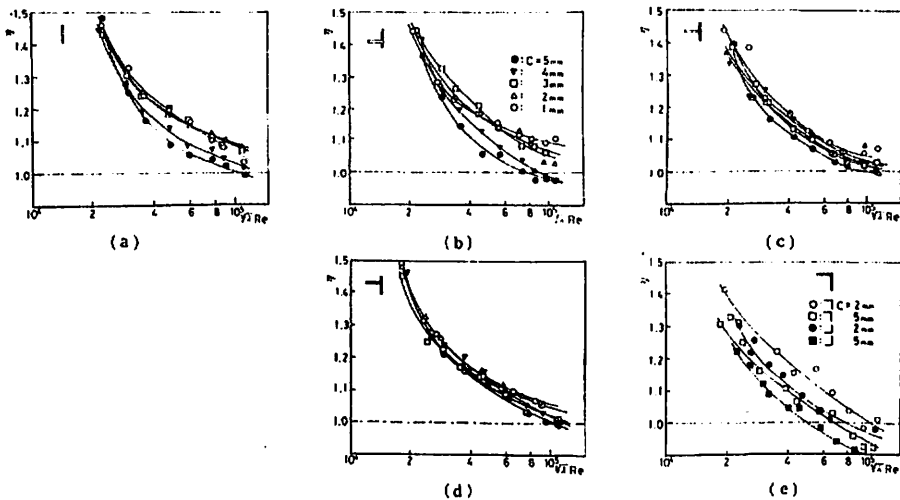


図13 η - R_o 線図(形状の影響)

合 $\sqrt[3]{\lambda} Re = 4 \times 10^4$ で $\eta = 1.2$, $\sqrt[3]{\lambda} Re = 2 \times 10^4$ で $\eta = 1.4$ に達し、促進体として有効なことが明らかである。これは前報⁽¹⁾で示した円柱千鳥配列の促進体と比べて η の著しい向上が実現されている。

つぎに I, T₁, T, T₀ および L 形に対して同様の整理を行ったものを図 13(a)~(e) に示す。まずすきまの影響について述べる。図 13(c), (d) では C の影響はほとんどみられない。これは λ に対する C の影響が大きい促進体に対するものである (図 11)。一方図 13(a), (b) は C による変化、すなわち流動パターンの変化の影響が η に現れている。明らかにうず放出抑制すきま以下の C では η は高い値をとる。一般に $C \leq 3 \text{ mm}$ に限れば C による η の差はほとんどみられない。したがって前述の h_x の流れ方向変化の均一化を考慮すると、最適すきまとしてカルマン渦抑制限界よりわずかに小さいすきまを選ぶのが好ましい。無次元すきま比 C/D で表せばほぼ 0.3 である。つぎに形状については I 形が最もよく、ついで T₁ 形であるがその差はほとんどない。平行部つきの場合の η は $\theta = 60^\circ$ の場合よりわずかに大きい。図 13(e) は反転形は標準形に比べて η は劣下することを示す。

4. 結 論

以上の実験結果を要約すればつぎのとおりである。

(1) 千鳥配列の熱的性能比は対配列の場合より優れている。本実験の促進体 (とくに I, T₁, $\theta = 60^\circ$ 形)

の η は高く、前報⁽¹⁾の円柱列に比べて著しい η の向上が実現された。

(2) 局所熱伝達率分布はすきまを変化させた場合、 $C = 3 \sim 4 \text{ mm}$ ($C/D = 0.27 \sim 0.36$) を境として変化する。熱伝達促進の支配的因子は $C \leq 3 \text{ mm}$ では再付着効果、 $C \geq 4 \text{ mm}$ ではカルマン渦放出効果である。

(3) $C \leq 3 \text{ mm}$ では性能比 η の C による差異は小さい。C = 3~4 mm の場合、局所熱伝達率の流れ方向の変化の振幅が最も小さくなる。この点からカルマン渦抑制限界よりわずかに小さいすきまが最適すきまと評価された。

(4) 流路内にそう入された促進体のカルマン渦抑制は $C = 3 \sim 4 \text{ mm}$ ($C/D = 0.27 \sim 0.36$) で起こり、外部流 (乱流境界層にそう入) の場合と本質的に変わらない。

文 献

- (1) 親川・馬淵, 機論, 48-432, B (昭57), 1509.
- (2) 長谷川・ほか3名, 第13回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭51-5), 100.
- (3) 一宮・横山, 第20回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭58-6), 79.
- (4) 藤田・ほか2名, 機論, 42-361 (昭51), 2828.
- (5) 藤田・ほか2名, 機論, 49-442, B (昭58), 1178.
- (6) Everitt, K. E., *Aeronaut. Q.*, 33-1 (1982), 90.
- (7) 棚沢・ほか3名, 機論, 49-439, B (昭57), 676.
- (8) Bergles, A. E., ほか2名, *Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.*, Tokyo, II (1974-9), 239.