流れに直交する一列円柱群からの熱伝達*

服部直三^{*1}, 高橋忠^{*2}

Heat Transfer from a Single Row of Circular Clinders Placed in the Transverse Direction of Water Flow

Naozo HATTORI and Tadashi TAKAHASHI

Experiments were carried out on forced convection heat transfer from a single row of circular cylinders in cross flow, in a water tunnel. Average and local Nusselt numbers for a cylinder, placed at a lateral cylinder spacing from $1.3d$ to $3.3d$, were measured precisely in the Reynolds number range from 80 to 6×10^3 . A correlation equation for average Nusselt number is given in a relatively high Reynolds number range, regardless of the interaction between wake flows behind the cylinders.

Key Words: Heat Transfer, Forced Convection, Circular Cylinder, Cylinder Spacing, Wake Flow

1. ま え が き

流れに直交した管群(円柱群)からの熱伝達に関する研究は、直交流形熱交換器に関連して重要であり、古くから行われている。管群のうち最も単純な配列、すなわち、流れに直交して置かれた一行管群(直列円柱)および一列管群(並列円柱)についても実験的研究がなされているが、後者のものについての報告は比較的少ない。

熊田ら⁽¹⁾は並列3本円管の熱伝達率をレイノルズ数 $Re \approx 10^4 \sim 3.2 \times 10^4$ 、円管中心間距離 $L/d = 1.0 \sim 3.75$ につきナフタリン昇華法を用いて測定し、円管後流との関連において言及している。また、相場ら⁽²⁾は一列管群についての熱伝達実験を $Re \approx 2.1 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ 、 $L/d = 1.1 \sim 2.0$ につき、作動流体として空気を用いて行った。局所および平均熱伝達率を求め、実験式を提示している。

一方、一列管群まわりの流れについて詳細に調べた研究も報告されている。石谷・西川⁽³⁾は一列管群の後流の様相を $Re \approx 4 \times 10^3 \sim 3.3 \times 10^4$ 、 $L/d = 1.2 \sim 3.0$ に

ついて調べ、渦形成領域の大きさは $L/d \geq 2.5$ では単管と大差はないが、 $L/d \leq 2$ になると管間噴流の偏向の影響で隣接管で違うようになる、と述べている。小林⁽⁴⁾は $Re \approx 2 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$ 、 $L/d = 1.5, 2.0$ について、円柱後方の速度分布および円柱まわりの圧力分布を測定し、 $L/d = 2.0$ では各円柱に対する速度分布、圧力分布は同じものを示すが、 $L/d = 1.5$ になるとそれらに違いが生じてくる、と指摘している。

上述のように、これまでの研究はレイノルズ数の比較的高い範囲 $Re \approx 10^4$ 以上を対象としているが、本研究では、 $Re \approx 10^4$ 以下における一列円柱群の熱伝達特性を円柱群まわりの流れとの関連において調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は文献(5)のものと同一回流水槽を用いているので、ここでは省略する。図1は熱伝達率の測定のために用いた円柱の詳細を示したものである。円柱はベークライト丸棒④に銅・ニッケル線(線径0.2mm)③を同一ピッチに巻き付け加熱部とし、それを銅管(管径14mm、長さ65mm、肉厚0.25mm)②に挿入して作った。銅管表面には表面温度測定用の熱電対(銅-コンスタンタン、線径76 μ m)①が円周方向2箇所(180°間隔)に埋め込んである。

* 原稿受付 平成5年4月16日。

^{*1} 正員, 東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎2641)。^{*2} 東京理科大学大学院。

図2はテストセクションにおける円柱の配列を示したもので、円柱は流れに対し直角方向の一直線上に取付けられている。これらの円柱のうち中央の3円柱①、②のみが一樣に加熱され、試験円柱①が熱伝達率の測定に用いられる。それぞれの円柱間の距離（円柱中心間距離） L は変えられるようになっており、ここでは円柱中心間距離 L/d を $L/d=1.3, 1.5, 2.0, 2.5, 3.3$ と変えて測定を行った。このような配列に対して、3円柱を直流加熱しそれぞれの円柱の加熱量が等しくなるようにして、試験円柱①の局所および平均熱伝達率の測定を行った。局所ヌッセルト数は円柱を回転させ角度 20° おきに測定し、また平均ヌッセルト数は角度 20° おきに測定した円周18点の温度を平均したものを円柱表面温度とし、それと主流温度との温度差から算出した。

一方、円柱群まわりの流れと熱伝達特性との関係を

図1 試験円柱

図2 円柱配列

調べるため、同じ回流水槽実験装置による円柱群まわりの流れの可視化をトレーサ法を用いて行った。流れの可視化に用いた円柱は熱伝達率測定のものと同じ直径 $d=14$ mm を有し、軸方向 50 mm の長さになつてトレーサ放出用の穴（直径 0.3 mm）を 2 mm おきに 25 個あけたものである。トレーサは円柱の前方よどみ点から定常的に放出され、写真撮影される。

3. 実験結果および考察

3.1 一列円柱群の熱伝達特性 図3は一列円柱群の熱伝達特性を示すもので、縦軸は平均ヌッセルト数 $\bar{Nu}$ を、横軸は主流速度に基づくレイノルズ数 Re_M をそれぞれ表す。ここで、平均ヌッセルト数 $\bar{Nu}$ とレイノルズ数 Re_M はそれぞれ次のように定義した。すなわち、

$$\bar{Nu} = \frac{dq}{\lambda(T_w - T_\infty)}, T_w = \frac{\int_0^{2\pi} T(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} d\theta}$$

$$Re_M = \frac{Ud}{\nu}$$

..... (1)

ここに

d : 円柱直径

q : 熱流束

T_w : 円柱表面温度

T_∞ : 主流温度

U : 主流速度

θ : よどみ点からの角度

λ : 流体の熱伝導率

ν : 流体の動粘性係数

図3は単独円柱(実線)⁽⁶⁾の結果も含むが、これからそれぞれの円柱中心間距離 L/d に対する熱伝達特性は単独円柱に対するものと同様特性を示すが、平均ヌッセルト数 $\bar{Nu}$ は L/d が小さくなるほど大きな値をもつことがわかる。

図4(a)は、図3の横軸のレイノルズ数 Re_M を円

図3 一列円柱群の熱伝達特性

柱間の最小流路断面の平均流速 u に基づくレイノルズ数 Re_L に書き改めたものである。このように定義したレイノルズ数を用いると、平均ヌッセルト数は L/d にそれほど影響されことなくほぼ同一直線上に整理できることがわかる。図4中の実線は最小二乗法を用いて近似したもので、次のような相関式

$$\bar{Nu} = 1.08 Re_L^{0.53} \dots\dots\dots (2)$$

で表せる。ここで、使用した水のプラントル数 Pr は 8.0 である。

上式(2)は単独円柱に対するものとほぼ同じである。図4(b)は円柱中心間距離 L/d を加味して、図4

(a)を整理し直したものである。実線は最小二乗法により近似したもので、次のような相関式

$$\bar{Nu} = 1.08 (L/d)^{-0.034} Re_L^{0.53} \dots\dots\dots (3)$$

で表せる。式(3)は式(2)とほとんど同じであるが、 $Re \geq 400$ において、データ点を比較的良好に整理できる。

図5は円柱まわりの局所ヌッセルト数分布をそれぞれの円柱中心間距離 L/d に対して示したものである。図5からわかるように、局所ヌッセルト数分布には顕著な違いはみられないが、 L/d が小さくなるのに伴いその分布は卵形から円形状に変わることがわかる。ま

図4 一列円柱群の熱伝達特性

図5 局所ヌッセルト数分布

図 6 一列円柱群まわりの流れの様相

た、円柱後面の局所ヌッセルト数分布においても、 $L/d=1.3\sim 2.0$ と $L/d=2.5\sim 3.3$ とで若干の違いがみられる。

3・2 円柱群まわりの流れの様相 図 6 に円柱群まわりの流れの様相の一例を示す。図 6 は、円柱中心間距離 $L/d=1.3, 2.0, 3.3$ の場合で、いずれも円柱列の中央 3 円柱の前方よみ点からトレーサを放出して写真撮影したものである。 $L/d=3.3$ の場合、各円柱から放出されるカルマン渦は互いに干渉することなく、単独円柱と同じような渦形成を示す。 $L/d=2.0$ になると、後流はお互いに干渉するようになり、各円柱の渦形成領域の大きさが異なるようになる。この現象については石谷・西川⁽⁹⁾の実験でも認められている。このような流れの偏向はレイノルズ数の小さいところで顕著に現れている。さらに $L/d=1.3$ になると、後流の干渉の程度はさらに強くなり、渦形成領域の大きい領域内での渦形成が困難になる。 $L/d=2.0$ の場合と同様に、流れの偏向の程度はレイノルズ数が大きくなるのに伴い小さくなる。

3・3 円柱群まわりの流れと熱伝達 円柱群まわりの流れと熱伝達特性との関連性について言及する。

図 4 (a), (b) からわかるように、一列円柱群の平均ヌッセルト数は単独円柱のものと同じように表せ、

レイノルズ数 $Re_L \geq 400$ で比較的良好に整理できる。一方、 $Re_L \leq 400$ では L/d を加味してもデータ点に若干のばらつきがみられ、統一的な整理ができない。これは図 6 に示したように、円柱群の後流の偏向が $L/d \leq 2.0$ のレイノルズ数の比較的小さいところで顕著に現れていることに対応している。局所ヌッセルト数については、円柱後面の分布に $L/d=1.3\sim 2.0$ と $L/d=2.5\sim 3.3$ とで若干の違いがみられる。これは図 6 の後流の様相と対応している。

4. あとがき

流れに直交した一列円柱群の熱伝達特性を円柱中心間距離 L/d を変えながら、円柱群まわりの流れとの関係において調べた。この結果、

- (1) $L/d \leq 2.0$ では、各円柱の渦形成領域は円柱間の流れの偏向の影響で、大小の差が生じるようになる。偏向の程度はレイノルズ数の小さいほど、著しい。
- (2) 流れの偏向の局所および平均熱伝達率に及ぼす影響は少なく、平均熱伝達率は L/d にほとんど関係なく、円柱間の最小流路断面の平均速度に基づくレイノルズ数を用いた相関式で表せる。これは単独円柱に対するものと同じである。

文 献

- (1) 熊田・ほか3名, 第19回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1982), 91.
 - (2) 相場・ほか2名, 第19回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1982), 88.
 - (3) 石谷・西川, 機論, **40**-337(1974), 2599.
 - (4) 小林, 機論, **42**-357(1976), 1452.
 - (5) 服部・徳永, 機論, **59**-558, B(1993), 556.
 - (6) Zukauskas, A., *Adv. Heat Transf.*, **18**(1987), 124.
-