円柱列からの強制対流熱伝達*

服部直三^{*1}, 徳永幸二^{*2}Convection Heat Transfer from Three Circular Cylinders
to Water at Relatively Low Reynolds Numbers

Naozo HATTORI and Koji TOKUNAGA

Experimental investigations were made of the measurement of heat transfer coefficients for a single row of three circular cylinders in cross flow, using a water tunnel. Average and local Nusselt numbers for the cylinders, placed at a longitudinal cylinder spacing from $2d$ to $5d$, were measured precisely in the Reynolds number range from 70 to 8×10^3 . Flow visualization was also conducted to examine the flow patterns around a cylinder. From the obtained results, it was found that heat transfer characteristics of cylinders, located downstream of the 1st cylinder, varied moderately with the change in flow pattern upstream.

Key Words: Heat exchanger, heat transfer, forced convection, cross flow, circular cylinder, row of cylinders, wake

1. ま え が き

流れに直交して置かれた管群(円柱群)まわりの流れと熱伝達に関する研究は直交流形熱交換器の設計から重要視され, これまで数多く行われている。

石谷・西川⁽¹⁾は一行管群(直列5円柱)に対する流れの特性(円柱まわりの圧力分布, 圧力変動, ストローハル数)をレイノルズ数 $Re \approx 1.4 \times 10^3 \sim 1.35 \times 10^4$ について調べ, 円柱中心間距離 $L/d \leq 1.5$ では渦の形成は管群中では起こらず, 最後列の管背後のみで生成され, $L/d \geq 2$ では管群中の各管でカルマン渦が発生することを報告している。五十嵐・鈴木⁽²⁾は直列三本円柱まわりの流れ特性を $Re \approx 1.1 \times 10^4 \sim 3.9 \times 10^4$, $L/d = 1.0 \sim 4.0$ にわたって, 作動流体として空気を用いて調べた。また, 五十嵐⁽³⁾は直列4本円柱まわりの流れ特性を $Re \approx 8.7 \times 10^3 \sim 3.9 \times 10^4$, $L/d = 1.0 \sim 2.65$ にわたって明らかにした。熱伝達については, 相場ら⁽⁴⁾の $Re \approx 1.2 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$, $L/d = 1.15 \sim 5.0$ における直列4円柱についての実験がある。

一方, 直列2円柱まわりの流れと熱伝達については, Kostic-Oka⁽⁵⁾の $Re \approx 1.2 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$, $L/d = 1.6 \sim 9.0$ に対する圧力分布, 熱伝達率の測定, 檜和田ら⁽⁶⁾による $Re \approx 1.5 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$, $L/d = 1.03 \sim 6.0$ についての実験, および五十嵐・山崎⁽⁷⁾の $Re \approx 3.9 \times 10^3 \sim 6.2 \times 10^4$, $L/d = 1.3$ に対する空気を用いた実験, などがある。また, 相場ら⁽⁸⁾は直列3円柱の第1円柱にトリッピングワイヤを取付け, 第2円柱の熱伝達, 圧力, 速度, 乱れ分布を $Re \approx 1.2 \times 10^4 \sim 5.2 \times 10^4$, $L/d = 1.3 \sim 5.0$ にわたって空気を用いて測定し, 流れと熱伝達の関係調べた。

上述のことからわかるように, 従来の研究はいずれも作動流体として空気を用い, レイノルズ数 Re の比較的大きい $Re \approx 10^4$ 以上を対象としたものである。本報告では, レイノルズ数の比較的小さい範囲 $Re \approx 7.0 \times 10^3 \sim 8.0 \times 10^3$ に対する直列3円柱の熱伝達特性と円柱列まわりの流れとの関係を作動流体として水を用いて調べた。

2. 実験装置および実験方法

図1に使用した回流水槽実験装置の概略を示す。装置は水槽①, ポンプ②, 流量測定部③, 整流部④, 絞り部⑤, およびテストセクション⑥などからなり, 作動

* 平成3年5月29日 第28回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成4年4月2日。

*1 正員, 東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎 2641)。

*2 准員, 石川島播磨重工業(株) (〒190-12 東京都西多摩郡瑞穂町殿々谷 229)。

流体である水はテストセクション部を鉛直上方向に流れるようになっている。図1において、ポンプ②を介して水槽①から吸い込まれた流体は流量測定部③、ディフューザ④、コーナ羽根⑤、整流部⑥、絞り部⑦、を通して一様流にされテストセクション⑧に導入される。テストセクション(280×154 mm)には、流れに対して直角方向に試験円柱3本が配置されてある。テストセクション⑧の上流側の流量測定部③には、広範囲の流量が測定できるように、2個のオリフィス流量計③が並列に取付けてある。

試験円柱の詳細を図2に示す。円柱はベークライト丸棒④に銅ニッケル線(線径0.2 mm)③を同一ピッチに巻き付け加熱部とし、それを銅管(長さ65 mm, 管径14 mm, 肉厚0.25 mm)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 μm)①が円周方向2箇所(180°間隔)に埋め込んである。

図3は熱伝達率測定装置の系統図で、装置の主要部分は熱電対③、④、直流定電圧装置⑤、直流電流計⑥、直流電圧計⑦、零接点制御装置⑧、スイッチコントロールユニット⑨、デジタルボルトメータ⑩、およびパーソナルコンピュータ⑫などから構成されている。円柱表面温度③および主流温度測定用熱電対④のおのの起電力はスイッチコントロールユニット⑨を介して指定された円柱のものに選別され、デジタルボルトメータ⑩でデジタル信号に変換された後、通信回路⑪を通してパーソナルコンピュータ⑫に送られる。コンピュータに入力された熱電対の起電力は直ちに温度に変換される。一方、各試験円柱①の加熱ヒータ②には直流定電圧装置⑤、直流電流計⑥、直流電圧

計⑦が接続され、任意の安定した電力が供給できるようになっている。円柱に加えられる加熱量はそれぞれの回路の電圧計、電流計の指示値から算出される。このようにして算出した円柱の加熱量と前述した円柱表面温度と主流温度の測定値から円柱まわりの局所ヌッセルト数、平均ヌッセルト数を算出した。局所ヌッセルト数は円柱を回転させ角度10°おきに測定し、一方、平均ヌッセルト数は角度30°おきに測定した12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。

図4は試験円柱の配列を示したもので、3本の円柱は流れ方向に一直線上に配置されている。これらの円柱を上流側から第1円柱、第2円柱、第3円柱と呼ぶ

図2 試験円柱

図1 回流水槽実験装置

図3 データ測定装置

ことにし、ここではこれらの円柱中心間の距離（円柱中心間距離） L を六つ、すなわち、 $L/d=2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0$ と変えて実験を行った。このような配列に対して各円柱を直流加熱し、それぞれの加熱量を等しくして熱伝達率の測定を行った。

一方、円柱まわりの流れと熱伝達特性の関係を明らかにするため、同じ回流水槽実験装置による円柱まわりの流れの可視化をトレーサ法を用いて行った。この方法はコンプレッサ、減圧弁を用いてタンク内のトレーサ（スキムミルクの水溶液）を加圧し、トレーサをビニールチューブを通して可視化用円柱に送り、円柱前面のよどみ点から流体中に放出させるものである。円柱列まわりの流れの様相はテストセクション側壁のスリットを通した光線により観察され、写真撮影される。流れの可視化用円柱は熱伝達率測定のものと同じ直径 $d=14\text{ mm}$ を有し、軸方向 50 mm の長さにわたって、トレーサ放出用の穴（直径 0.3 mm ）が 2 mm おきに 26 個あけてある。

3. 実験結果および考察

3.1 単独円柱の熱伝達特性 直列三本円柱の熱伝達特性を調べるのに先がけ、実験装置の精度を確認するため単独円柱に対する熱伝達率を測定した。図5(a), (b)はそれらの結果である。単独円柱に対する平均ヌッセルト数 $\overline{Nu}_0$ とレイノルズ数 Re との関係を示したものが図5(a)である。ここで、平均ヌッセルト数 $\overline{Nu}_0$ とレイノルズ数 Re はそれぞれ次のように定義した。すなわち

$$\overline{Nu}_0 = \frac{dq}{\lambda(T_w - T_\infty)}, T_w = \int_0^{2\pi} T(\theta)d\theta / \int_0^{2\pi} d\theta$$

$$Re = ud/\nu$$

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

図4 試験円柱の配列

λ : 流体の熱伝導率

ν : 流体の動粘性係数

図5(a)にはZukauskas⁽⁹⁾, Churchill-Bernstein⁽¹⁰⁾らの結果も示してあるが、これらは本実験値とほぼ一致している。図5(b)は単独円柱まわりの局所ヌッセルト数 Nu_θ を三つのレイノルズ数 Re について示したもので、この分布の左右対称性からテストセクション部における流れの一様性が確認できる。

3.2 円柱列の熱伝達特性 図6は直列三本円柱に対する実験結果で、円柱中心間距離 $L/d=2.0, 3.0, 4.0$ の場合の第1, 第2, 第3円柱の平均ヌッセルト数 $\overline{Nu}_1, \overline{Nu}_2, \overline{Nu}_3$ とレイノルズ数 Re との関係をそれぞれ示したものである。図6中には比較のため単独円柱に対する結果も示してある。図6から、それぞれの熱伝達特性は単独円柱のものから若干ずれているが、そのずれは第2円柱に対して最も著しいことがわかる。すなわち、第2円柱の場合は $L/d=2.0, 3.0, 4.0$ のいずれについても単独円柱からのずれが現れている。この場合、平均ヌッセルト数 $\overline{Nu}_2$ の値はレイノルズ数 Re の比較的小さい範囲、 $Re < 700 \sim 900$ では単独円柱に対するものより若干小さい値を示すが、それ

(a) 平均ヌッセルト数

(b) 局所ヌッセルト数分布

図5 単独円柱の熱伝達特性

よりレイノルズ数 Re の大きい範囲では、反対に大きな値を示すようになる。一方、第1円柱に対する熱伝達特性は $L/d=2.0, 3.0$ の場合につき若干の違いは認められるが、 $L/d=4.0$ については単独円柱のものと同一特性を示す。また、第3円柱については、 $L/d=2.0$ の場合、第2円柱のものと同様な熱伝達特性を示すが、 $L/d=3.0$ では単独円柱の熱伝達特性を、 $L/d=4.0$ になるとレイノルズ数 Re の大きい範囲で平均ヌッセルト数 $\overline{Nu}_3$ は単独円柱より大きな値を示すようになる。

上述の円柱列のそれぞれの円柱に対する熱伝達特性の違い、およびそれらの単独円柱に対する違いをより明らかに示したものが図7である。図7の縦軸は第1、第2、第3円柱に対する平均ヌッセルト数 $\overline{Nu}_1, \overline{Nu}_2, \overline{Nu}_3$ を単独円柱のもの $\overline{Nu}_0$ で割ったものである。図7は円柱中心間距離 $L/d=2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0$ のそれぞれの場合について示してある。前述のように、図

7から円柱列に対する平均ヌッセルト数の値の単独円柱のものからのずれは、上流側、下流側円柱の影響を強く受ける第2円柱が最も著しく、 $2.0 \leq L/d \leq 4.0$ の範囲にわたってこの影響が強くみられる。この範囲における平均ヌッセルト数の比 $\overline{Nu}_2/\overline{Nu}_0$ はレイノルズ数 Re およそ700~900近傍を境に大きく変化している。これより小さいレイノルズ数 Re 範囲では $\overline{Nu}_2/\overline{Nu}_0$ は1より小さく、反対に大きな範囲では1より大きな値を示している。しかし、 $L/d \geq 5.0$ ではこのような傾向はみられなくなり、 $\overline{Nu}_2/\overline{Nu}_0$ の値は測定レイノルズ数範囲にわたって1より大きくなる。

第1円柱では、 $L/d=2.0, 5.0$ を除く $2.5 \leq L/d \leq 4.0$ の範囲に対してレイノルズ数の比較的小さい範囲において $\overline{Nu}_1/\overline{Nu}_0$ は1より大きい値を示すが、レイノルズ数の大きい範囲ではほぼ1に近い値を示している。一方、円柱中心間距離の最も接近した $L/d=2.0$ では、レイノルズ数の大きい範囲において $\overline{Nu}_1/\overline{Nu}_0$ は1より

(a) $L/d=2.0$ の場合 (b) $L/d=3.0$ の場合

図6 円柱列の熱伝達特性

り大きい値を示す。また、 $L/d=5.0$ では測定レイノルズ数範囲にわたって $\overline{Nu}_1/\overline{Nu}_0$ の値は1より若干大きい。

第3円柱については、 $L/d=2.0$ の場合は第2円柱とほぼ同じような傾向を示すが、他の L/d については測定レイノルズ数範囲にわたって $\overline{Nu}_3/\overline{Nu}_0$ 値のそれほど顕著な変化はみられない。 $2.5 \leq L/d \leq 5.0$ の範囲にわたって $\overline{Nu}_3/\overline{Nu}_0$ はほぼ1より大きな値を示し、またレイノルズ数が大きくなるのにもとないこの値は大きくなる傾向にある。

次に各円柱に対する $\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$ の値の比較を行う。第1円柱に対する $\overline{Nu}_1/\overline{Nu}_0$ 値はレイノルズ数の比較的小さい範囲において、第2、第3円柱に対するものより大きい。レイノルズ数の大きい範囲では逆にこれらより小さな値を示す。しかし、 L/d の比較的大きい $L/d=5.0$ では、レイノルズ数の小さい範囲にお

る各円柱に対する $\overline{Nu}/\overline{Nu}_0$ 値の違いは小さくなる。

図8は円柱まわりの局所ヌッセル数分布を円柱中心間距離 $L/d=2.0, 3.0, 5.0$ の三つの場合について示

(c) $L/d=4.0$ の場合

図6 円柱列の熱伝達特性

図7 円柱列における熱伝達率の単独円柱に対する割合

したもので、おのおのの図は三つのレイノルズ数 Re に対するデータを表している。ここで、円柱列のおおの分布を単独円柱 [図5(b)] に対するものと比較すると、第1円柱に対するものは単独円柱に近い局所ヌッセル数分布を示すが、 $L/d=5.0$ 以外の第2円柱に対するものは、これとはかなり異なった分布を示していることがわかる。この傾向は前述した熱伝達特性の違いと良く対応している。一方、第3円柱に対する局所ヌッセル数分布は $L/d=2.0, 3.0$ のいずれの場合も同じような様相を示しているが、単独円柱に対するものとは異なっている。円柱中心間距離が大きい場合、 $L/d=5.0$ については、第1, 第2, 第3円柱

とも同じような様相を示している。これはこれらの熱伝達特性が同じようなものを示していることに対応している。

3・3 円柱列まわりの流れの様相 円柱まわりの流れと熱伝達特性との関係を明らかにするために、トレーサ法による流れの可視化を行った。図9はこれらの結果である。

図9には円柱中心間距離 $L/d=2.0, 3.0, 5.0$ の三つの場合が、それぞれいくつかのレイノルズ数に対して示してある。図9からわかるように $L/d=2.0$ の場合、レイノルズ数 $Re \approx 78$ では各円柱からの渦放出はまったく現れず、第1, 第2, 第3円柱は一つの後流を形

図8 円柱列における各円柱の局所ヌッセル数分布

成する。 $Re \approx 118$ になると、第1、第2円柱の背後には双子渦が形成されるようになるが渦放出は起こらない。しかし、第3円柱の後方でははく離せん断層が渦に巻き込まれ渦放出が起こる。さらにレイノルズ数が大きくなり、 $Re \approx 508$ になると渦放出はさらに上流側の第2円柱にも現れるが、第1円柱からの渦放出は起こらない。 $Re \approx 1140$ になっても、第1円柱背後の双子渦は、その強さは増すが、放出されない。

$L/d=3.0$ の場合についても、上述と同様のことが言える。 $Re \approx 73$ の場合、各円柱からの渦放出は起こらず、第1、第2、第3円柱は一つの後流を形成する。レイノルズ数 $Re \approx 100$ 近傍から第3円柱からの渦放出が起こり始める。レイノルズ数がさらに増加し、 $Re \approx 140$ になると、渦放出は第2円柱の背後にも現れ、第3円柱は上流側から放出される渦の通路になる。このような様相は $Re \approx 530$ まで続き、 $Re \approx 800$ 近傍になると第1円柱の背後から渦が放出されるようになる。

一方、 $L/d=5.0$ では、 $Re \approx 70$ で第2、第3円柱背後で渦放出が起こり、 $Re \approx 141$ になるとこれが第1円柱の背後にもみられるようになる。

上述のことから、円柱列からの渦放出は円柱中心間距離 L/d によってその様相を異にすることがわかる。すなわち、円柱列の各円柱からの渦放出は L/d が小さくなるほど困難になる。第1円柱背後から渦放出が起こり始めるレイノルズ数は $L/d=2.0$ では $Re > 1140$ 、 $L/d=3.0$ では $Re \approx 800$ 、および $L/d=5.0$ では $Re \approx 140$ 程度である。

3.4 円柱列まわりの流れと熱伝達 ここでは、円柱中心間距離 $L/d=2.0, 3.0, 5.0$ に対する各円柱の熱伝達特性と円柱背後からの渦放出との関係について述べる。

図6に示した円柱列の熱伝達特性について考察する。 $L/d=2.0$ の場合、 $Re \approx 500$ 近傍で第2円柱の背後から渦放出が起こり、この近傍から第3円柱の熱伝達率は単独円柱のものと同程度になり、さらに第1円柱

図9 円柱列まわりの流れの様相

の背後から渦放出が起こる $Re \approx 1000$ 近傍からは単独円柱より大きな値を示すようになる。第2円柱については、第1円柱からの渦放出の起こる $Re \approx 1000$ 近傍からの熱伝達率が大きくなっている。

同様のことは $L/d=3.0$ についても言える。 $L/d=3.0$ の場合、第3円柱の熱伝達特性は測定レイノルズ数範囲にわたって単独円柱のものと同一である。第2円柱からの渦放出は $Re \approx 140$ 近傍であり、この近傍から若干ヌッセルト数が大きくなっている。第2円柱については、第1円柱からの渦放出が $Re \approx 800$ 近傍であり、この近傍からヌッセルト数も大きくなっている。

$L/d=5.0$ では円柱相互間の影響は弱くなり、 $Re \approx 140$ 近傍でも第1円柱背後から渦放出が起こる。したがって、第1、第2、第3円柱の熱伝達特性は測定レイノルズ数にわたって同じような特性を示すようになる。

上述のことから、下流側円柱の熱伝達特性は上流側円柱の渦放出に大きく支配されていることがわかる。すなわち、下流側円柱の熱伝達率は上流側円柱からの渦放出が起こり始めると大きい値を持つようになり、上流側円柱からの渦放出がない場合は単独円柱より低い値を示す。

4. 結 論

作動流体として水を用いて、レイノルズ数範囲 $Re \approx 7.0 \times 10 \sim 8.0 \times 10^3$ における直列3円柱に対する熱

伝達率の測定および流れの可視化を行い、次のような結果を得た。

(1) レイノルズ数 Re およそ 700~900 近傍より小さい範囲では、第1円柱の平均ヌッセルト数は第2、第3円柱のものより大きな値を持つが、これよりレイノルズ数の大きい範囲では反対に小さい値を示すようになる。これは各円柱からの渦放出に深い関係がある。

(2) 円柱列の熱伝達特性の単独円柱からのずれは上流側、下流側円柱の影響を受ける第2円柱において最も著しい。

(3) $L/d=5.0$ では、各円柱間の干渉の程度は弱まり各円柱の熱伝達特性はほぼ同じような様相を呈すが、レイノルズ数の大きい範囲において第2、第3円柱の平均ヌッセルト数は第1円柱に対するものより若干大きな値を示す。

文 献

- (1) 石谷・西川, 機論, **40**-337(1974), 2599.
- (2) 五十嵐・鈴木, 機論, **50**-451, B(1984), 624.
- (3) 五十嵐, 機論, **51**-467, B(1985), 2061.
- (4) 相場・ほか2名, 機論, **46**-406, B(1980), 1134.
- (5) Kostic, Z. G. and Oka, S. N., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15**(1972), 279.
- (6) 樽和田・ほか2名, 機論, **48**-427, B(1982), 499.
- (7) 五十嵐・山崎, 機論, **55**-517, B(1989), 2800.
- (8) 相場・ほか2名, 機論, **45**-399(1979), 1697.
- (9) Zukauskas, A., *Adv. Heat Transf.*, **18**(1987), 124.
- (10) Churchill, S. W. and Bernstein, M., *J. Heat Transf.*, **99**(1977), 300.