傾斜円柱からの強制対流熱伝達*

服部直三^{*1}, 大森公広^{*2}, 木村貞二郎^{*3}

Forced Convection Heat Transfer from Yawed Circular Cylinders to Air

Naozo HATTORI, Kimihiro OOMORI and Jojiro KIMURA

Experiments have been carried out for measuring the average heat transfer coefficients for yawed circular cylinders, 5, 8 mm and 20 mm in diameter, using a wind tunnel. The effect of the yaw of a cylinder on heat transfer characteristics was examined for yaw angles of $16^\circ \sim 90^\circ$ at the Reynolds numbers from 2×10^2 to 5×10^4 . The flow visualization was also conducted to observe the flow patterns around a cylinder. From these results, experimental formulae were derived to estimate heat transfer from yawed circular cylinders.

Key Words: Forced Convection, Heat Transfer, Yawed Cylinder, Circular Cylinder, Flow Visualization

1. ま え が き

流れに傾斜した細線からの熱伝達に関する研究は、熱線風速計に用いられるホットワイヤに関連して古くから行われている^{(1)~(3)}。これらの多くは軸方向および法線方向の速度成分を考慮することにより、流れに傾斜したワイヤの熱伝達率を評価し、実験式を導出している。

一方、小形化、軽量化を目指したシェルアンドチューブ形熱交換器の設計においても、流れに傾斜した管群に対する熱伝達評価が必要とされ、これに関連した研究がいくつか行われている。これらのなかには、Chiu-Lienhard⁽⁴⁾, Smithら⁽⁵⁾, 白樫ら⁽⁶⁾の傾斜円柱まわりの流れに関するもの、Kraabel⁽⁷⁾, Sparrow-Moreno⁽⁸⁾, Groehn⁽⁹⁾の熱伝達に関するものがある。後者はいずれも傾斜円柱の法線方向の速度成分に基づくレイノルズ数を用いた熱伝達率の整理を試みている。すなわち、Kraabel⁽⁷⁾は傾斜円柱まわりの局所熱伝達率をレイノルズ数 $Re = 3.4 \times 10^4$, 1.06×10^5 に

き測定し、後方よみ点における局所ヌッセルト数が法線方向の速度成分に基づくレイノルズ数で整理できると述べている。Sparrow-Moreno⁽⁸⁾は傾斜角 $\phi = 30^\circ \sim 90^\circ$, レイノルズ数 $Re = 9.0 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^4$ の範囲につき熱伝達率の測定を行い、熱伝達率が傾斜角の減少に伴って単調に低下しないことを示し、さらに法線方向の速度成分に基づくレイノルズ数で熱伝達率を整理すると、主流によるものよりデータ点の広がり範囲が大きくなると言及している。一方、Groehn⁽⁹⁾はレイノルズ数 $Re = 2.0 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^4$, $\phi = 15^\circ \sim 90^\circ$ について調べ、 $Re = 2.5 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^4$, $\phi = 30^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で熱伝達率は法線方向の速度成分に基づくレイノルズ数で整理できることを示している。上述のことからわかるように、Sparrow-Moreno⁽⁸⁾とGroehn⁽⁹⁾のデータはそれぞれ相反する結果を与えている。

本研究では、流れに傾斜した円柱に対する平均熱伝達率を傾斜角 $\phi = 16^\circ \sim 90^\circ$, レイノルズ数 $Re = 2.0 \times 10^2 \sim 5.0 \times 10^4$ において測定するとともに、円柱まわりの流れの可視化を行い、これらの結果から熱伝達整理式の導出を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した風洞は全長 5 m で、テストセクション部における乱れ強さは 1.5% のものである。図 1 に

* 平成 4 年 7 月 21 日 日本機械学会大分地方講演会において講演、原稿受付 平成 5 年 1 月 28 日。

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

^{*2} 准員、東洋エンジニアリング(株) (〒275 習志野市茜浜 2-8-1)。

^{*3} 准員、東京理科大学理工学部。

テストセクション部の詳細を示す。図1からわかるように、テストセクション部は長さ1050 mm、流路断面積150 mm×200 mmを有し、その上下壁の中央には長さ425 mmにわたってスリット溝が切られている。スリットにはトラバース装置③が取付けてあり、これをスライドさせることにより流れに対する試験円柱の角度(傾斜角 ϕ)を任意に調節することができる。

一方、テストセクションの対向する側壁にはアクリル製の観測窓④が取付けてあり、試験円柱まわりの流れの様相が観察できるようになっている。テストセクション上部の光源はこのためのもので、光源からの光線はスリットを通してテストセクション部に入射する。本実験ではスモークワイヤ法による流れの可視化を行った。可視化はスモークワイヤ(線径0.50 mm、ニクロム線)をそれぞれ円柱の上流側および下流側に取付けて行った。図2にはスモークワイヤと試験円柱との位置関係を示す。

試験円柱の詳細を図3に示す。円柱の加熱部は、ベークライト製の円柱②にエナメル被覆のCu-Ni線(線径0.2 mm)③を長さ84 mmにわたって均一に巻き、それに真ちゅう製円管④をかぶせたものである。円管には表面温度測定用の銅-コンスタンタン熱電対(線径0.05 mm)①が埋め込んである。本実験では、このようにして作られた直径の異なる三つの試験円柱(直径 $d = 5, 8, 20$ mm)を用いたが、直径20 mmの円柱につい

ては非加熱部の熱伝達率測定面への影響を除くため、加熱部の両端にガードヒータを取付けた。

円柱表面の温度測定はおおのこの傾斜角 ϕ に対して、試験円柱を円柱軸まわりに30°おきに回転させて行った。一方、円柱の加熱量は印加電圧と電流値から求め、これと円柱表面の平均温度と主流温度から平均ヌッセルト数を算出した。円柱を加熱するための電源は電圧変動を極力避けるため、定電圧装置を備えた直流電源を用いた。

3. 実験結果および考察

3・1 熱伝達特性 傾斜円柱の熱伝達率測定を行うのに先がけ、実験装置の精度を確認するため流れに直交した円柱(傾斜角 $\phi = 90^\circ$)に対する実験を行った。図4はその結果で、平均ヌッセルト数 Nu とレイノルズ数 Re との関係を示す。

平均ヌッセルト数 Nu 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、

$$\left. \begin{aligned} Nu &= \frac{dq}{\lambda(T_w - T_\infty)}, T_w = \int_0^{2\pi} T(\theta) d\theta / \int_0^{2\pi} d\theta \\ Re &= \frac{Ud}{\nu} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

図1 テストセクション

図2 スモークワイヤ

図3 試験円柱

図4 直交流における円柱の熱伝達特性

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

で、式(1)に含まれる物性値 λ は膜温度により評価した。図4には Sparrow-Moreno⁽⁸⁾, Groehn⁽⁹⁾, Hilpert⁽¹⁰⁾らの結果も示してあるが、これらは本実験値とよく一致している。レイノルズ数 $Re \approx 10^3$ 近傍で若干データのばらつきがみられるが、これは低流速によるマノメータの読取り誤差である。

図5は傾斜円柱に対する平均ヌッセルト数 Nu とレイノルズ数 Re との関係を、傾斜角 $\phi = 90, 70, 45, 16^\circ$ について示したものである。図5には円柱直径 $d = 5, 8, 20$ mm のデータが含まれているが、 $\phi = 90, 16^\circ$ については、円柱直径の比較的大きい $d = 50$ mm に対する Groehn⁽⁹⁾ の実験データも示してある。図5から、傾斜円柱の熱伝達率は傾斜角 ϕ が小さくなるに伴い低下することがわかる。また、この割合は傾斜角の小さいところにおいて著しい。

3.2 円柱まわりの流れの様相 傾斜円柱からの熱伝達を把握するため、円柱まわりの流れの様相を調べた。

図6は円柱まわりの流れの様相を $\phi = 90, 70, 45, 16^\circ$ についてそれぞれ示した写真である。いずれもスモークワイヤに対して平行方向から見たものである。定量的な言及はできないが、傾斜円柱まわりの定性的な流れの傾向を把握することはできる。 $\phi = 90^\circ$ ではスモークワイヤからの白煙は円柱前方から後方まで一直線の流脈を形成している。これは円柱まわりの流れが円周方向、半径方向の二次元流れであることを示している。 $\phi = 70^\circ$ になると、円柱前方で若干の主流からずれた流れがみられるが、円柱の後流は二次元的である。 $\phi = 45^\circ$ では、円柱前方の曲がった流れとともに、円柱表面に沿った円周方向流れ(円柱表面上のしま模様)もみられる。円柱背後の流れは三次元の様相を示す。傾斜角の小さい $\phi = 16^\circ$ では、円柱前面の円柱軸に沿った軸方向流れと円柱側面の円周方向流れがみられる。円柱背後の流れは三次元流れとなり、渦の巻き込みはみられない。最下端の白煙の帯は主流の流脈である。

3.3 熱伝達率の整理式 これまで傾斜円柱の熱伝達に対する整理式は円柱の法線方向の速度成分を考慮したものがいくつかあげられる^{(7)~(9)}。図7はそれに

よる本実験データの整理結果で、横軸のレイノルズ数 Re_n は、

図5 傾斜円柱の熱伝達特性

$$Re_n = \frac{Ud}{\nu} \sin \phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

で定義されたものである。図7から、円柱の法線方向の速度成分のみを加味しただけでは、実験データを整理できないことがわかる。前述の流れの可視化の写真からわかるように、傾斜角が比較的大きい場合には、円柱まわりの流れは、ほとんどが円周に沿った円周方向の流れである。しかし、傾斜角が徐々に小さくなると円柱前面で軸方向流れが現れるようになり、また、円柱背後の流れも三次元的な様相を示すようになる。

このようにして、傾斜円柱の熱伝達は円柱の法線方

図6 円柱まわりの流れの様相

向と軸方向の速度成分に依存するであろうことがわかり、熱伝達率の整理式にこれらの二つの成分の寄与を考慮することにする。すなわち、傾斜円柱の平均ヌセルト数 Nu_ϕ は両方向の速度成分を加味して、

$$\frac{Nu_\phi}{Nu_{\phi=90^\circ}} = (\sin \phi + F \cos \phi)^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表す。ここで、 $\sin \phi, \cos \phi$ はそれぞれ法線方向および軸方向速度の寄与、 n は定数、 F は補正係数である。 F としては最もよく実験データを整理できる値、 $F=0.20$ を用いた。

図8は式(3)による整理結果である。図8において横軸は次のように定義したレイノルズ数 $Re_{n,a}$,

$$Re_{n,a} = \frac{Ud}{\nu} (\sin \phi + 0.20 \cos \phi) \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。図8中の実線は最小二乗法により求めたもので次式により表される。

$$Nu_\phi = 0.449 Re_{n,a}^{0.519} \quad \dots\dots\dots (5)$$

レイノルズ数 $Re \approx 10^3$ 以下および 10^4 以上において、実線からの実験値のずれが若干みられる。

図9は測定されたレイノルズ数範囲にわたり、実験

図7 傾斜円柱の熱伝達特性
(法線方向の速度成分に基づく)

図8 傾斜円柱の熱伝達特性
(軸方向と法線方向の速度成分に基づく)

図9 傾斜円柱の熱伝達特性
(軸方向と法線方向の速度成分に基づく)

データをよく整理できるように領域を二つに分けたものである。図9中の点線は垂直円柱 $\phi=90^\circ$ に対する Fand-Keswani⁽¹¹⁾ の式

$$Nu_{\phi=90} = 0.590 Re^{0.467} \quad (4 \times 10^2 < Re < 4 \times 10^3)$$

$$Nu_{\phi=90} = 0.154 Re^{0.627} \quad (4 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^4) \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。実線は Fand-Keswani にならって、レイノルズ数 $Re_{n,a} = 4 \times 10^3$ を境にしてそれぞれ最小二乗法を用いて求めたものである。すなわち、垂直円柱を含めた傾斜円柱に対する平均ヌセルト数 Nu_ϕ は $16^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ に対して

$$Nu_\phi = 0.856 Re_{n,a}^{0.433} \quad (2 \times 10^2 < Re_{n,a} < 4 \times 10^3)$$

$$Nu_\phi = 0.161 Re_{n,a}^{0.631} \quad (4 \times 10^3 < Re_{n,a} < 5 \times 10^4) \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられ、測定レイノルズ数範囲にわたり実験値をよく整理できる。

比較的レイノルズ数の大きい範囲については、垂直円柱に対する Groehn⁽⁹⁾ の式

$$Nu_{\phi=90} = 0.206 Re^{0.63} Pr^{0.36} \quad (2.5 \times 10^3 < Re < 10^5) \quad \dots\dots\dots (8)$$

による結果も示してある。ここに、 Pr はプラントル数である。

4. 結 論

傾斜円柱の熱伝達率を直径の異なる三つの円柱につ

いて測定するとともに、円柱まわりの流れの様相をスモークワイヤ法を用いて調べた。これらの結果から、次のような結果が得られた。

傾斜円柱の無次元熱伝達率 Nu_ϕ は、円柱の軸方向と法線方向の速度成分の寄与を考慮したレイノルズ数 $Re_{n,a}$ を定義することにより、実験データをよく整理できる。すなわち、傾斜円柱の平均ヌセルト数 Nu_ϕ は $16^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ に対して

$$Nu_\phi = 0.856 Re_{n,a}^{0.433} \quad (2 \times 10^2 < Re_{n,a} < 4 \times 10^3)$$

$$Nu_\phi = 0.161 Re_{n,a}^{0.631} \quad (4 \times 10^3 < Re_{n,a} < 5 \times 10^4)$$

で与えられる。

文 献

- (1) King, L. V., *Phil. Trans. R. Soc., London, Ser. A*, **214** (1914), 373.
- (2) Sandborm, V. A. and Laurence, J. C., *NACA Tech. Note*, No. 3563 (1955).
- (3) Champagne, F. H., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, **28** (1967), 153.
- (4) Chiu, W. S. and Lienhard, J. H., *Trans. ASME, ser. D*, **89-4** (1967), 851.
- (5) Smith, R. A., Woo Taik Moon and Kao, T. W., *Trans. ASME*, **94** (1972), 771.
- (6) 白樫・磯野・脇屋, 機論, **52-481, B** (1986), 3152.
- (7) Kraabel, J. S., McKillop, A. A. and Baughn, J. W., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **25** (1982), 409.
- (8) Sparrow, E. M. and Yanez Moreno, A. A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **29** (1986), 427.
- (9) Groehn, H. G., *Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf.*, (1986), 1013.
- (10) Hilpert, R., *Forsh. Gebiete Ingenieurwes.*, **4** (1933), 215.
- (11) Fand, R. M. and Keswani, K. K., *Trans. ASME*, (1973), 224.