円柱後流内に直角に置かれた円柱からの熱伝達*

藤田 秀 臣^{*1}, 佐 藤 英 明^{*2}, 河 村 鈞^{*1}Heat Transfer from a Cylinder Laid in a Wake of the Other Cylinder
Arranged Perpendicularly Each Other

Hideomi FUJITA, Hideaki SATO, and Hitoshi KAWAMURA

The purpose of this study is to show distributions of the pressure coefficient and the heat transfer coefficient on a cylinder which is laid in a wake of another cylinder and to clarify the influence of the clearance between the two cylinders on the flow and heat transfer characteristics around the cylinder. The experiment was mainly made at the Reynolds number of 5×10^4 . The naphthalene sublimation technique was employed to obtain the heat transfer coefficient distribution on the whole surface of a cylinder. Distributions of the pressure coefficient and the heat (mass) transfer coefficient changed complicatedly according to the clearance and the axial position, and those changes were caused by the axial flow along the cylinder made by the non-uniformity of the oncoming flow in addition to the turbulence intensity of it.

Key Words: Convective Heat Transfer, Naphthalene Sublimation Technique, Circular Cylinder, Two Cylinders, Wake Flow, Axial Change, Pressure Distribution

1. 緒 言

円柱表面からの熱伝達に関する研究は数多く報告されているが、それらは単独円柱の場合はもとより、管群を対象としている場合においても、近寄り流れが円柱軸に沿って一様な場合がほとんどであって、軸方向に変化する場合を扱った報告は非常に少ない。熱交換器の側壁の影響に関連して、平板の境界層内に直立した円柱に対する研究がわずかにみられる程度である^{(1)~(3)}。しかし、実際の伝熱機器においては、柱状物体の後方に伝熱管が設置されている場合も多い。にもかかわらず、後流中にある円柱の熱伝達を扱った研究は、著者の知るかぎり見当たらないようである。

そこで本研究では、このような最も基本的な場合として、図1に示すように、一様流中に流れに直角に置かれた円柱の後流中に、さらに1本の円柱が上流側円柱に対して直角に置かれている場合を取り上げ、下流側円柱のまわりの流動および熱伝達に及ぼす2円柱間の距離の影響を実験的に明らかにすることを試みた。

2円柱の直径が等しい場合がより基本的ではある

* 昭和61年5月27日 第23回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和63年5月25日。

^{*1} 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町1)。

^{*2} 正員、日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町1-1)。

が、ブロックage比を大きくせずに、また後流の影響領域が側板の影響を受けないように、しかも測定対象である下流側円柱の直径を小さくすることによる測定精度の低下をさけるため、現象の本質は変わらないものと考えて、本実験では異径円柱を用いた。

同径2円柱ではあるが、本研究と同様の流れ場について、Zdravkovich⁽⁴⁾および山田ら⁽⁵⁾は、整流金網や骨組構造物の基本要素との考えから、互いに接している直交2円柱のまわりの圧力分布や後流の流動特性などの測定結果を報告している。また、稲垣らは音響特

図1 円柱の配列

性との関連から、2円柱間の間げきが直径の1/2の場合について円柱表面の流れを可視化した結果を示している⁽⁶⁾。2円柱の間げきが広い場合についても、山田ら⁽⁷⁾および田村ら⁽⁸⁾は流動特性に関する実験を試みている。

本報では、2円柱間の間げきを上流側円柱の直径の8倍程度まで変化させて、下流側円柱のまわりの熱伝達率分布を、ナフタリン昇華法によって、円周方向だけでなく軸方向にも詳しく測定した結果を示すとともに、下流側円柱のまわりの圧力分布ならびに円柱表面の流れの観察結果についても示し、熱伝達特性に及ぼす上流側円柱の影響を円柱まわりの流れとの関連において明らかにしようとするものである。

2. 実験装置および方法

下流側測定用円柱は、既報⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と同様、直径 $d_2=50$ mm、長さ 400 mm であり、吸込形風洞の測定部断面 (400 mm×500 mm) の中央に流れに直角に設置された。その上流に間げき s を隔てて直径 $d_1=20$ mm の上流側円柱を、図1のように測定用円柱に対して直角に設置した。実験は既報と同様、主としてレイノルズ数 $Re=U_0 d_2/\nu=5\times 10^4$ で行った。ここに、 U_0 は主流速度、 ν は空気の動粘度である。2円柱間の間げき s は、25 mm から 165 mm ($s/d_1=1.25\sim 8.25$) の範囲で 20 mm ごとに変化させた。

下流側円柱のまわりの圧力分布は、既報⁽⁹⁾と同じ圧力分布測定用円柱を用い、全周にわたり 5° ごとに測定した。この円柱の圧力孔は軸方向には移動できないので、上流側円柱を相対的に移動させることにより軸方向各断面の圧力分布を測定した。

円柱まわりの熱伝達率分布は、ナフタリン昇華法による熱伝達と物質伝達のアナロジーより求めた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。本方法は、円周方向だけでなく軸方向にも現象が変化する本実験のような場合には特に有効である。物質伝達率を測定する円柱は、図2のように測定部①と支持部④、⑤、⑥から構成されており、測定部の中央 120 mm にナフタリン②を鑄込む。この円柱を所定の条件の下で時間 τ だけ風洞中に設置し、この間の昇華量 δ から、局所物質伝達率 h_m を次式により求めた。

$$h_m = \rho_N R_N T_0 \delta / (P_N \tau) \quad (1)$$

ここに、 T_0 は主流の絶対温度、 ρ_N はナフタリン(固体)の密度、 R_N はナフタリンの気体定数、 P_N は円柱表面におけるナフタリンの飽和蒸気圧を表す。円柱のまわりの局所の昇華量は、ロータリエンコーダと精度 1 μ m のゲージセンサをもつ特製の装置によって、軸方向 5 mm、周方向 1° の間隔で測定し、直接マイクロ

コンピュータに取り込んだ。

単独円柱について測定した物質伝達率分布を図3に示す。横座標 ϕ は前方岐点からの角度であり、縦座標中の Sh は次式で定義されるシャード数である。

$$Sh = h_m d_2 / D \quad (2)$$

ここに、 D はナフタリンの空気中への拡散係数である。円柱の背面においては、レイノルズ数によって、また檜和田ら⁽²⁾や Goldstein ら⁽³⁾の結果との間にも差はあるが、これは実験条件の違いによるものと思われる。しかし、円柱前面の分布には大差はない。また過去の報告例において、前方岐点近傍では、壁温一定と熱流束一定の実験結果の間に大差はない。そこでステンレス鋼はくを巻き、通電加熱した円柱において測定された前方岐点近傍の熱伝達分布⁽¹⁰⁾との比較を試みた。熱伝達と物質伝達との間のアナロジー

$$Sh/Nu = c(Sc/Pr)^n \quad (3)$$

における指数は $n=0.37$ となり、妥当な値であった⁽³⁾⁽¹¹⁾。しかし本報では、測定結果はヌッセルト数 Nu に換算せず、シャード数 Sh によって表示する。なお、上式において Sc はシュミット数を、 Pr はプラントル数を表す。

3. 実験結果および考察

3.1 上流側円柱の後流 下流側円柱にとっては

① test section ② naphthalene
③ pin ④ ⑤ ⑥ holder

図2 物質伝達率測定用円柱

図3 単独円柱の物質伝達率分布

近寄り流れとなる上流側円柱の後流の平均速度分布と乱れ強度分布を図4と図5に示す。いずれも下流側円柱がない状態での測定結果であるが、対称性は非常に良好である。図4の縦座標の u_1/U_0 は後流内の速度欠損である。 $x/d_1=1.75(s/d_1=1.25)$ の下流側円柱先端位置に相当する)の場合には、後流中心での速度欠損が非常に大きく、 $y/d_1=1\sim 2$ に負の欠損すなわち主流よりも加速されている部分が明りょうに認められる。 x/d_1 の増加とともに後流の幅は広がっているが、本実験範囲では $y/d_1=2.5$ においてほぼ $u_1=0$ になっている。乱れ強度は、はく離せん断層内すなわち後流中心からやや離れた位置で極大値を示している。ただし $x/d_1=8.75$ においてはこの極大はもはや顕著ではない。また、

図4、5の比較から、平均速度に比べて乱れ強度のほうが軸方向により広がっていることがわかる。なお、主流の乱れ強度は0.5%であった。

3・2 下流側円柱の圧力分布 図6に下流側円柱のまわりの圧力分布の測定例を示す。縦軸は圧力係数
$$c_p = (p - p_0) / (\rho U_0^2 / 2) \dots\dots\dots (4)$$
である。ここに、 p_0 は主流の静圧、 ρ は空気の密度を表す。図6中の実線は上流の円柱がない単独円柱の結果である。後流中に設置した場合、本実験範囲ではいずれの s/d_1 についても後流中心から離れた $y/d_1=2.5$ においては、円柱前面の分布は単独円柱の場合とほぼ一致しており、側面から背面にかけても c_p の値はやや小さいが形状は単独円柱と似ている。しかし一般に

図4 上流円柱の後流の速度欠損分布

図5 上流円柱の後流の乱れ強度分布

(a) $s/d_1=1.25$

(b) $s/d_1=2.25$

(c) $s/d_1=8.25$

図6 下流側円柱のまわりの圧力分布の測定例

は近寄り流れが一様でないため、 s/d_1 だけでなく y/d_1 によっても分布形状は複雑に変化している。

まず間げきの広い $s/d_1=8.25$ の図 6 (c) において、 $y/d_1=2.5$ の分布は $\phi=65^\circ$ で最小値をとり、はく離点と推測される位置⁽⁹⁾も $\phi=80^\circ$ であり、 c_p の値はやや小さいが形状は単独円柱と似ている。したがって、円柱上の境界層も層流のままはく離していると推測される。他方、乱れ強度が大きい $y/d_1 \leq 1.0$ における分布では、最小値が大幅に減少し、その位置も $\phi=75 \sim 85^\circ$ に移動している。はく離点と思われる位置も $\phi=120^\circ$ と下流に移動し、森下らの乱れ強度が大きい場合⁽¹¹⁾や Achenbach のレイノルズ数が非常に高い supercritical flow の場合⁽¹³⁾に近い。この点からは境界層は乱流に遷移したのちのはく離していると推察される。しかし円柱背面における圧力回復は上記の場合と比較して非常に小さく、現象的に同一視することはできないようにも思われる。 $y/d_1=1.5$ と 2.0 の分布は上述の二つの中間的な形状を示している。なお、 $y/d_1=0 \sim 2.5$ の広範囲にわたって $\phi=120^\circ$ よりも後方の c_p がほぼ一定である点が注目される。

図 6 (b) の $s/d_1=2.25$ では、後流の幅が狭く乱れ強度も強くなるため、 $y/d_1=1.5$ においても分布は単独円柱に似ている。 $y/d_1 \leq 0.5$ の分布では、 $\phi=120^\circ$ でいったん一定値になり、その後圧力は回復して後方岐点では y/d_1 によらずほぼ同じ値になっている。2 円柱をさらに近づけた $s/d_1=1.25$ では、後流幅がさらに狭いため、図 6 (a) のように $y/d_1=1.0$ においても、単独円柱と類似の分布形状がみられる。 $y/d_1 \leq 0.5$ においても、最小圧力の低下は著しくはなく、全体的に分布形状は単独円柱に似ている。しかし、最小圧力点の下流

の $\phi=110^\circ$ で極大が、 $\phi=130^\circ$ で極小が認められるなど、円柱背面での複雑な流れの存在が推察される。この図においても後方岐点の値は y/d_1 によらず同一値を示している。

図 7 は各圧力分布における前方岐点および後方岐点の値 c_{pst} と c_{pb} を y/d_1 に対して示したものである。 c_{pst} は、一般に近寄り流れの速度欠損に応じて後流中心に向かって減少している。しかし、 $s/d_1=2.25$ と 4.25 の間には明りょうな差が認められ、この間で 2 円柱間の流れに著しい変化が生じているものと考えられる。後方岐点の値 c_{pb} は、すでに図 6 にみたように s/d_1 および y/d_1 によらずほぼ一定値を示しており、その値は一点鎖線で示した単独円柱の値より約 10% 小さい。 c_{pb} が軸方向にあまり変化していないが、これには円柱背面での $y/d_1=0$ から両側に広がっていく軸方向の流れが、重要な働きをしているように思われる。この流れは $\phi=180^\circ$ に取付けたタフトが後流中心から外側へわずかに傾くことにより確認された。なお田村らは、本実験や山田ら⁽⁷⁾の結果とは異なって c_{pb} が s/d_1 の増加とともに大きくなる結果を報告している⁽⁸⁾。両者の差異の原因についてはいまのところ明らかではない。

図 8 は円柱表面の流れの様子を油膜法によって観察した例である。はく離位置にほぼ対応すると考えられる白い線が、後流の中心近傍でかなり下流側へくびれている様子がよくわかる。とくに $s/d_1=2.25 \sim 4.25$ においては、図 8 (b) にみられるような、両側から $y/d_1=0$ に向かう軸方向成分をもつ流れの存在をうらづける斜めのすじが明りょうに観察された。

3.3 下流側円柱の物質伝達率 図 9 に下流側円

図 7 前方および後方岐点の圧力係数

(a) $s/d_1=1.25$

(b) $s/d_1=4.25$

図 8 円柱表面の流れ(油膜法)

図 9 下流側円柱のまわりの物質伝達率分布の測定例

図 10 円柱前面($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$)の寄与

図 11 周方向平均シャーウッド数

柱のまわりの物質伝達率の測定例を示す。なお、太い実線は単独円柱の結果を表す。まず、図 9(c)の $s/d_1 = 8.25$ において、後流中心から最も離れた $y/d_1 = 2.5$ では、 Sh は前方岐点から減少して $\phi = 80^\circ$ で最小値をとり、その直後にこぶ状の極大値をもち、その後ゆるやかに増加している。他方、後流中心の $y/d_1 = 0$ の分布は、 $\phi = 85 \sim 90^\circ$ で最小値をとり、その後 $\phi = 120^\circ$ で大きな極大値を示している。これらの間には中間的な分布形状が観察される。このとき上述の極大値は y/d_1 の増加とともに減少し、その位置も上流へ移動している点特徴的である。この特徴は $s/d_1 \geq 4.25$ に認められた。

$s/d_1 = 2.25$ の場合には、図 9(b)のように分布形は y/d_1 によってあまり変化せず、 $\phi = 120^\circ$ に前方岐点に匹敵する。あるいはそれよりも大きい極大があり、乱

流遷移後にはく離する場合にみられるような分布を示している。このため後方岐点に向かって Sh は減少しているとはいえ、図 10 にみるように、全物質伝達に対する円柱背面の寄与が大きくなっている。またこの場合には、後流の幅が狭くなっているにもかかわらず、上流円柱の影響が $s/d_1 \geq 4.25$ よりも広い範囲に及んでいる点が注目される。

2 円柱の間げきが最も狭い $s/d_1 = 1.25$ では、 $s/d_1 = 2.25$ と同様、図 9(a)のように分布形の y/d_1 による差異は小さい。また Sh は後方岐点に向かって減少することなく高い値を維持しているため、円柱背面における寄与は $s/d_1 = 2.25$ の場合よりもさらに大きい。 $y/d_1 = 0.5$ においては円柱前面の値がとくに高いが、これは乱れ強度が極めて高い上流円柱のはく離せん断層が直接この位置に衝突するためと考えられる。

図 12 軸方向平均シャーウッド数

$s/d_1 \leq 2.25$ においては、後流の幅が狭いにもかかわらず上流円柱の影響が広範囲に及んでいる。これは圧力分布の項でも述べたように、はく離領域において観察された後流中心から両側へ向かう軸方向の流れが大きく寄与しているためと思われる。

図 10 は、図 9 のような各円周方向分布より、全円周にわたって積分した Sh_{total} に対する、円柱前面 ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$) での積分値 Sh_{front} の割合を求め、比較したものである。すでに述べたように、 $s/d_1 \leq 2.25$ と $s/d_1 \geq 4.25$ とでは明らかに傾向が異なり、前者では前面の寄与が小さくなっている。とくに $s/d_1 = 1.25$ では、背面の寄与が非常に大きい。

図 11 は各軸方向断面で測定された図 9 のような分布を全周にわたって積分して求めた平均シャーウッド数 Sh_{mean} の軸方向変化である。 $s/d_1 = 1.25$ を除いて、一般に Sh_{mean} は $y/d_1 = 0$ で最大値をとり、両側に向かって減少している。そして、 s/d_1 が大きいほど小さくなる傾向はあるものの、その差はさほど大きくない。 $s/d_1 = 1.25$ の場合には、全般に高い値を示し、はく離せん断層が直接当たるとされる $y/d_1 = 0.5$ で最大値を示している。軸方向の変化の割合も小さいが、これは図 9 (a) にみたように円柱背面での物質伝達の増加が y/d_1 の広い範囲に及んでいるためである。いずれの s/d_1 についても、 $y/d_1 = 2.5$ においてなお Sh_{mean} は単独円柱より高い値を示している。その結果、図 11 を $y/d_1 = -2.5 \sim 2.5$ にわたって軸方向に平均した平均シ

ャーウッド数 $\overline{Sh}_{mean}$ も、図 12 に示すように、単独円柱に比べて 1.3 倍程度大きい。

4. 結 言

円柱の後流中に直角に置かれた円柱のまわりの圧力分布および熱(物質)伝達率分布を、2 円柱間の距離を種々変化させて、周方向だけでなく軸方向にも詳しく測定した。おもな結果は次のとおりである。

(1) 円柱まわりの圧力分布は、 $s/d_1 \geq 2.25$ の場合は y/d_1 の違いによって大きく変化するが、 $s/d_1 = 1.25$ の場合にはあまり変化しない。

(2) 物質伝達率分布は、 $s/d_1 \geq 4.25$ の場合には y/d_1 によって大きく変化するが、 $s/d_1 \leq 2.25$ においてはあまり変化せず、 y/d_1 の広い範囲にわたって円柱背面で物質伝達率が著しく向上する。

(3) 圧力分布および物質伝達率分布は、 s/d_1 や y/d_1 によって複雑に変化するが、これは近寄り流れの違いに加えて、はく離点の上流では後流中心へ向かい、円柱背面では逆に外側へ向かう円柱軸に沿う流れ成分の存在によるところが大きいと考えられる。

終わりに、実験装置の製作にご尽力いただいた名古屋大学工学部 藤城昭男、白木尚康両技官に謝意を表す。

文 献

- (1) Sparrow, E. H., Stahl, T. J. and Traub, P., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 27-2 (1984), 223.
- (2) 檜和田・河村・日比野・馬淵・熊田, 機論, 50-451, B (昭 59), 733.
- (3) Goldstein, R. J. and Karni, J., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 106-2 (1984), 260.
- (4) Zdravkovich, M. M., *J. Fluid Mech.*, 128 (1983), 231.
- (5) 山田・大坂・影山・武田, 機論, 53-486, B (昭 62), 333.
- (6) 稲垣・富田・村松・鈴木, 機論, 54-497, B (昭 63), 94.
- (7) 山田・大坂・影山・武田, 機講論, No. 845-1 (昭 59), 85.
- (8) 田村・木谷, 機講論, No. 870-9 (昭 62), 51.
- (9) 藤田・高浜・川合, 機論, 50-453, B (昭 59), 1275.
- (10) 藤田・高浜・川合, 機論, 51-464, B (昭 60), 1335.
- (11) 森下・野村, 船舶技術研究所報告, 5-5 (昭 43), 1.
- (12) Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J. (ed.) *Measurements in Heat Transfer*, 2nd ed., (1976), 397, Hemisphere.
- (13) Achenbach, E., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 18-12 (1975), 1387.