

円柱の後流における吹出しと吸込みの効果 I

高田 治彦*・倉沢 英夫**

(昭和47年3月14日受理)

1. はじめに

流れの中に置かれた bluff body (非流線形物体) に作用する大きな抵抗の原因は、主として物体背後に形成される低圧領域の存在によるものであることは良く知られているが、そのような低圧領域がいかなる機構によって発生するかはほとんど解明されていない。

Roshko (1954, 55)¹⁾²⁾は物体の後方に splitter plate (干渉板) を入れると物体の抵抗が減少することを見出し、下流の Kármán 渦列が物体背後の圧力低下と密接な関係があることを明らかにした。Wood (1964)³⁾および Bearman (1967)⁴⁾は2次元翼型の後縁を切取って bluff にし、そこから流体を吹出すと splitter plate と同様な効果があることを見出したが、これは吹出し (base bleed) によって後流の Kármán 渦列の形成が抑制されるためである。

本実験は、円柱の後端から吹出し、吸込みを行ない、それが円柱まわりおよび後流の圧力分布、渦の Strouhal 数などに及ぼす影響を調べたものである。

記号

b Kármán 渦列の幅

C_{DF} 圧力抗力係数 = (圧力抗力) / $\frac{1}{2}\rho U^2 d$

C_p 圧力係数 = $(p - p_\infty) / \frac{1}{2}\rho U^2$

C_{pb} 背圧係数 = $(p_b - p_\infty) / \frac{1}{2}\rho U^2$

C_{pb}' 円柱後縁における圧力係数

$C_{p_{wm}}$ 後流の極小圧力点における圧力係数 = $(p_{wm} - p_\infty) / \frac{1}{2}\rho U^2$

C_q 吹出し量係数 = Q/Udl (吹出しのとき正)

d 円柱の直径

d' 剝離した自由流線の幅 (Roshko のモデル)

f 渦の周波数

l 円柱のスパン

p 圧力

p_b 背圧

* 機械工学教室 助教授

** 大学院修士課程

- p_{wm} 後流の極小圧力点における圧力
 p_{∞} 一様流における圧力
 Q 吹出し(吸込み)の体積流量
 R_e Reynolds 数 = Ud/ν
 S Strouhal 数 = fd/U
 S_B^* Bearman の後流 Strouhal 数 = fb/U_s
 S_R^* Roshko の後流 Strouhal 数 = fd'/U_s
 U 一様流の速度
 U_j 吹出し(吸込み)の速度
 U_s 剝離点における自由流線上の速度
 x 円柱後縁から下流方向へ測った距離
 $x_{p_{wm}}$ 円柱後縁から後流の極小圧力点までの距離
 ρ 密度
 θ 前方よどみ点から測った角度

2. 実験装置と方法

実験装置の概要を図1に示す。使用風洞は測定部断面 60 cm ϕ の Göttingen 型低速風洞で、その乱流度は 1 ~ 3 % である。

模型円柱は直径 $d = 4.8$ cm のアクリル・パイプを使用し、スパンは $l = 40$ cm, 両端には流れの 2 次元性を保つための端板が取り付けられている。円柱は測定部断面の中心を通過して水平に設置され、スパン中央の円周に沿って直径 1.5 mm の圧力孔がいくつかあけられた。測定する立場から言えば、圧力孔はできるだけ多くしたいが、工作の都合上、半円周に 7 ~ 8 個設けるのがやっとである。この困難の解決策として、

図2にそれぞれ示されたような位置に圧力孔を設けた 2 種類の模型円柱を交互に使用する方法がとられた。模型が完全な円柱であり、流れが完全な一様流であると仮定すれば、

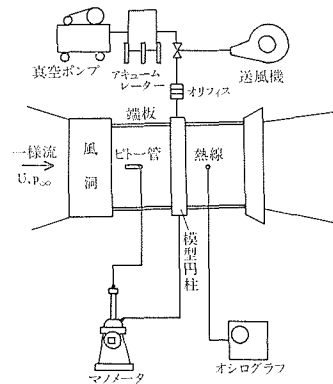
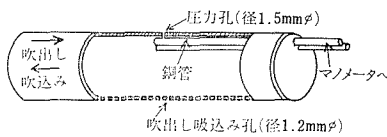
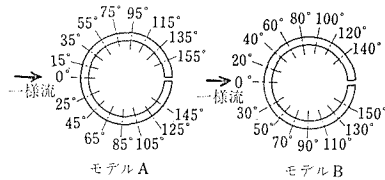


図1 実験装置配置図



(a) 円柱の構造



(b) 圧力孔の位置

図2 模型円柱

前方よどみ点($\theta=0$)のほか、 $\theta=15^\circ$ から 5° 間隔で $\theta=155^\circ$ まで計30点の測定点が得られることになる。 $\theta=180^\circ$ の近傍は吹出し、吸込みの孔があるため圧力孔を設けることができなかった。

円柱パイプの一方の端に接続した送風機あるいは真空ポンプを作動させ、円柱後端($\theta=180^\circ$)の母線上に2.5 mm 間隔にあげられた直径1.2 mmの孔の列から吹出し・吸込みが行なわれるようにした。吹出し・吸込みの流量 Q はオリフィスを用いて測定した。

吹出し・吸込みのスパン方向の一様性については定量的な検定は行なっていないが、ドライアイス煙を吹出させて条線を観測した限りではほぼ一様と考えて差支えないように思われる。

一様流速 U は測定部上流に設置されたピトー管で測定した。実験に使用した一様流速は $U \approx 9.7 \text{ m/s}$ であるから、円柱直径 d を用いた Reynolds 数に換算すれば $Re = 3.1 \times 10^4$ となり、円柱まわりの流れは層流であることが知られる。

渦の周波数 f は円柱後方に熱線を置き、その出力をペン書きオシログラフに記録して測定した。

3. 測定値の補正と誤差

風洞の blockage の影響を考慮すれば、模型はできるだけ小さいことが望ましいが、工作上の理由から上記の寸法が選ばれた。円柱直径と風洞直径の比は $4.8/60 = 0.08$ である。この値は blockage の影響を無視できるほど十分小さいとは言いが切れないが、その程度を正確に算定することが難しいため補正は行なわなかった。

ピトー管で測定した流速は、風洞断面における非一様性と、模型の blockage の影響により、そのまま一様流速として採用することには疑問がある。円中心の位置で、円柱がない場合の流速を一様流速の基準と考えて、実験時の測定値との違いを比較した例を表1に示した。

これで見ると、ピトー管の位置の違いによる誤差は U で約1%、 C_p で約2%の程度であることが分るが、それ以前にピトー管のマノメーターの読みの誤差が1%程度入っている。

表1 ピトー管の位置の違いによる測定値の差違

	基準値 (円柱なし, 円柱中心位置 にピトー管を置いた場合)	実験値 (円柱あり, 上流にピトー 管を置いた場合)
ピトー管の総圧と静圧の差 $p_t - p_\infty$	5.6 mm Aq	5.5 mm Aq
一様流速 $U = \sqrt{\frac{2(p_t - p_\infty)}{\rho}}$	9.70 m/s	9.62 m/s
$C_{pt} = \frac{p_t - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2}$	1.000	0.982

るので前者だけを補正することは余り意味がない。以上の考えから、測定値に対する補正はいっさい行なわなかった。したがって、誤差の程度は blockage の影響は別にしても約 4～5%を見積る必要がある。

吹出し・吸込み量 Q はオリフィスの検定曲線から読み取ったが、これについては約 6%の誤差が見込まれている。

4. 実験結果

4.1 円周に沿っての圧力分布

図3に円周に沿っての圧力分布を示す。ここで $C_q = Q/Ud_l$ は吹出し量係数を表わし、 $C_q < 0$ は吸込みを意味する。図から、吹出しのとき圧力分布曲線が全体として上方に移動し、吸込みのとき下方に移動することが分る。また吹出し量が增大すると、流れの上下対称性の崩れと、2種類の円柱を使用したことから生ずる測定値のばらつきが顕著になる。 C_q が大きいときの流れの非対称性については、すでに Wood や Bearman によって報告されている³⁴⁾。

$\theta \geq 150^\circ$ では吹出し・吸込による後流の攪乱の影響が著しいが、 $90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ では圧力はほぼ一定となるので、この範囲

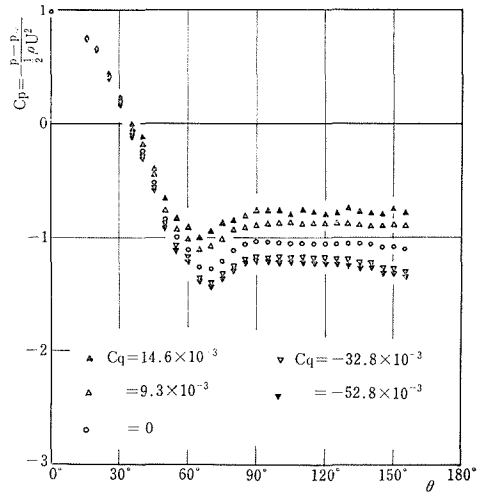


図3 円柱まわりの圧力分布 ($R_e = 3.1 \times 10^4$)

における圧力の平均をとって背圧 p_b (背圧係数 C_{pb}) と定義した。

図4に背圧係数 C_{pb} と、圧力分布曲線から計算した圧力抗力係数 C_{DF} とを C_q (あるいは吹出し速度 U_j) に対してプロットした結果を示した。これで見ると $-C_{pb}$ と C_{DF} の変化の様子は相似的で、 C_q が増加するほど減少する。逆に $C_q < 0$ のときは増加するが、

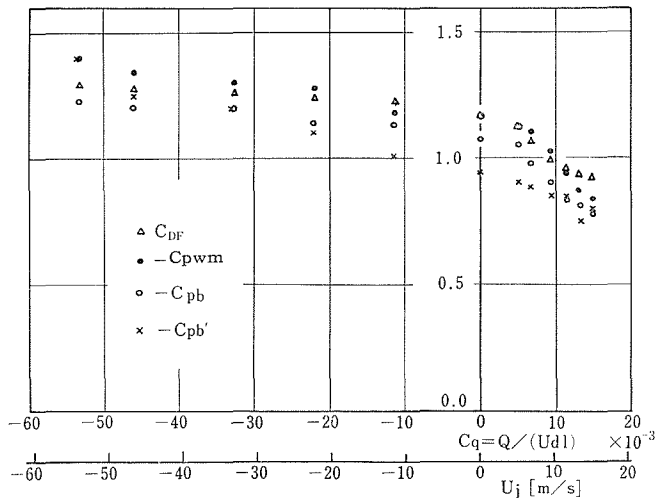


図4 C_{pb} , C_{pb}' , C_{pw} , C_{DF} の C_q による変化

吸込みの効果は吹出しに比べて遙かに小さい。Bearmanの実験では $C_q = 0$ をはさんで曲線が滑らかにつながっている結果が得られているが、この場合は吸込み面積が大きいので吸込みが効果的に行なわれるためではないかと推測される。本実験ではWoodやBearmanの場合と異って、吹出し・吸込み面積が極めて小さく、その結果、吹出し速度 U_j はずっと大きくなっているから、 C_q の値だけで結果を比較することは問題がある。

splitter plateを入れた場合、剝離角が減少することが知られているが¹⁾、吹出し・吸込みの場合は干渉の効果が十分でないので、剝離角の変化は少なくとも C_p 分布曲線から検知することはできない。

4・2 後流の圧力分布

吹出し・吸込みが後流に及ぼす影響を調べる目的で、円柱後縁から下流方向に沿って測定した後流の圧力分布を図5に示す。これは円柱後方に端板と平行に厚さ5mmのアクリル平板を置き、その平板に円柱後縁から1cm間隔に直径2mmの圧力孔を設けて、各点の静圧を測定したものである。

平板の干渉を考えると、測定値が平板がない場合の正しい静圧の値を示していない恐れが多分にある。図6には $C_q = 0$ の流れに対して、円柱まわりの C_p 分布曲線が平板の有無によってどれだけ違って来るかを比較してある。平板を置いた場合、物体背後の圧力は約10%高くなることが知られる。

$C_q \neq 0$ の流れについては特にこのような比較検討は行なわなかったが、図5から得られた円柱後縁の圧力係数を C_{pb}' として平板が無い場合の C_{pb} の値と比較してみると(図4)、 $C_q = 0$ の近傍では C_{pb} の方が C_{pb}' よりも10%程度低くなっているのに対し、 C_q の絶対値が大きいところでは両者の値が接近する傾向を示している。この傾向が単に測定の誤差による偶然の一致か、それとも物理的な根拠によるものであるかは今のところ判然と

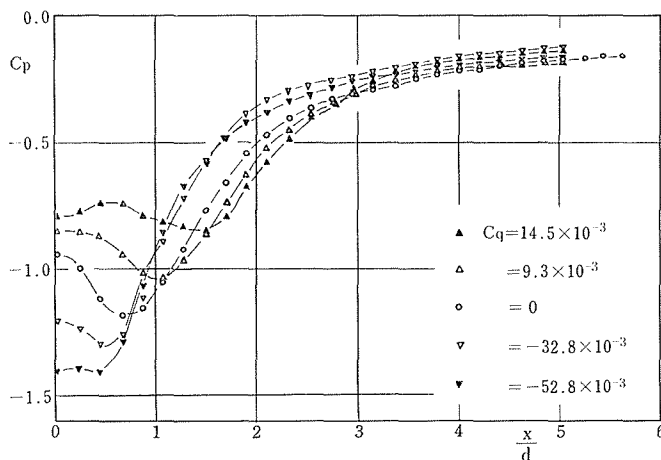


図5 後流中心線上の圧力分布

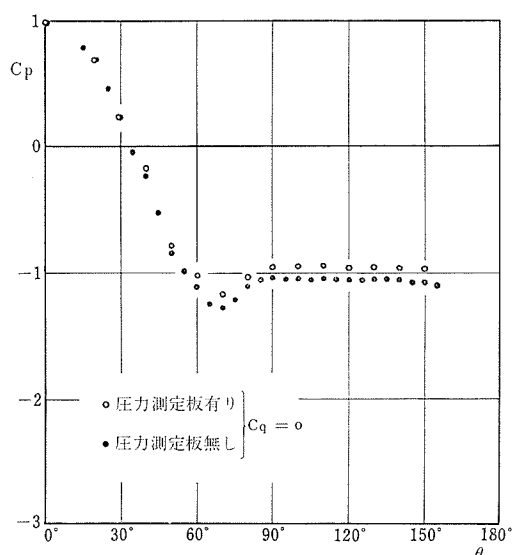


図6 圧力測定板の有無による円柱まわりの
圧力分布の違い

しない。しかし、もし後者であるならば、一般に平板の干渉は後流の圧力を高める働きをするが、流量 Q が増すと (C_q の正負にかかわらず) 干渉作用は相対的に減少するものようである。

以上の考察から、図5の測定結果は定量的にやや疑問があり、真の値より幾分高めめの値を示している可能性が大きい。この結果から幾つかの興味ある定性的結論を導き出すことができる。それらを列挙すると、

- (1) 後流の極小圧力 p_{wm} (係数 C_{pwm}) は吹出しが増すほど高くなり、逆に吸込みが増すほど低くなる (図4)。 $-C_{pwm}$ はほとんど C_{DF} の値に等しい。
- (2) p_{wm} が低いほど下流での圧力回復は早い (図5)。
- (3) 後縁から極小圧力点までの距離 x_{pwm} は吹出しが増すほど下流へ移動し、吸込みが増すほど上流へ移動する (図7)。
- (4) C_{pwm} と C_{pb} はほぼ比例関係にある (図8)。
- (5) x_{pwm} は C_{pwm} に対して、(したがって C_{pb} に対しても) ほぼ直線的に減少する (図9) などである。

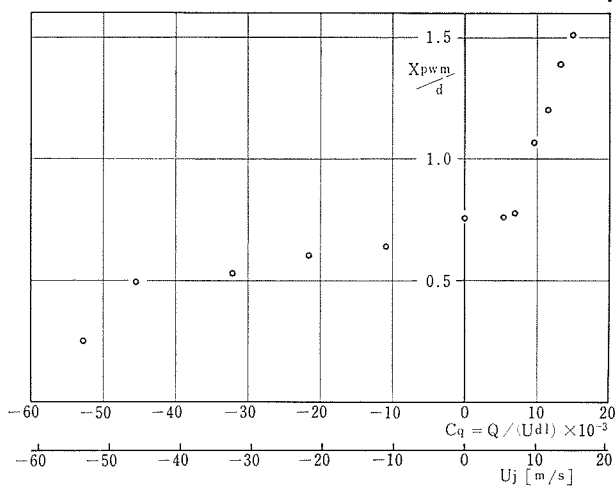


図7 後流の極小圧力点の位置の C_q による変化

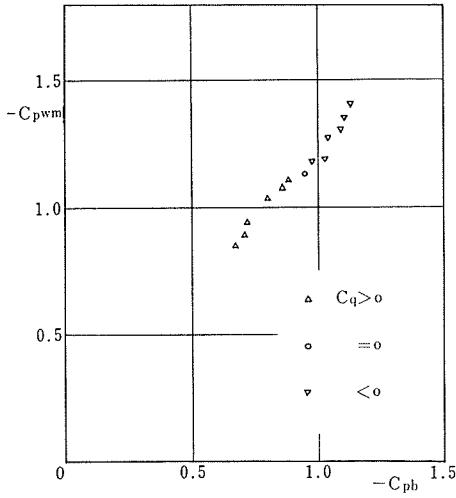


図8 C_{pb} と C_{pwm} との関係

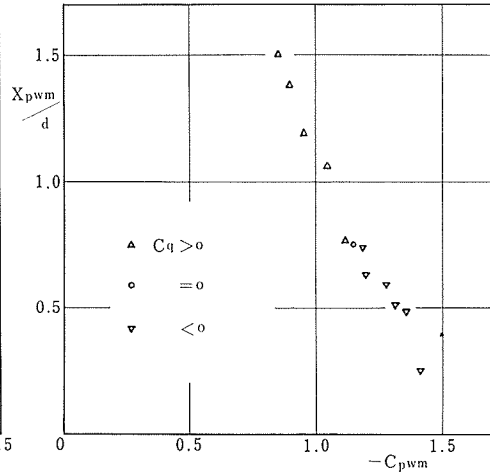


図9 後流の極小圧力点と位置との関係

4.3 Strouhal 数

図10に渦の Strouhal 数 $S = fd/U$ を C_q に対してプロットした結果を示した. S は C_q の増加に対して単調に増加している. Bearman の実験では C_q をずっと大きくして行くと, S は極大値を通過してのち再び減少する結果が得られているが⁴⁾, 本実験では吹出し面積が小さいので C_q を余り大きくすることができず, この点について確かめることはできなかった.

図11には S と C_p の関係を示してある. S は C_{pb} の減少にともなって減少するが, その変化は一様でない. 明らかに, 吹出しの場合と吸込みの場合とは異った曲線に乗っている.

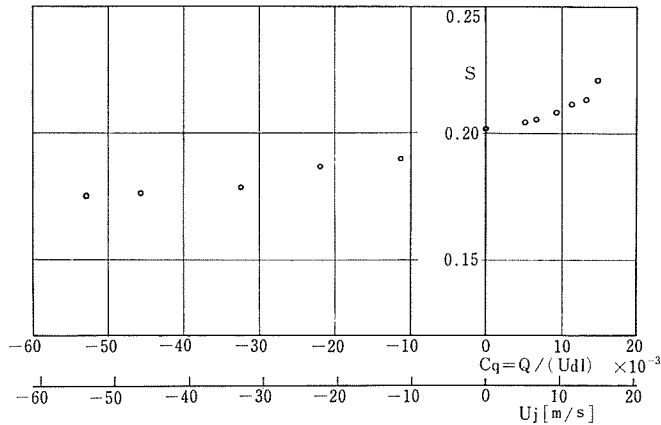


図10 Strouhal 数 S の C_q による変化

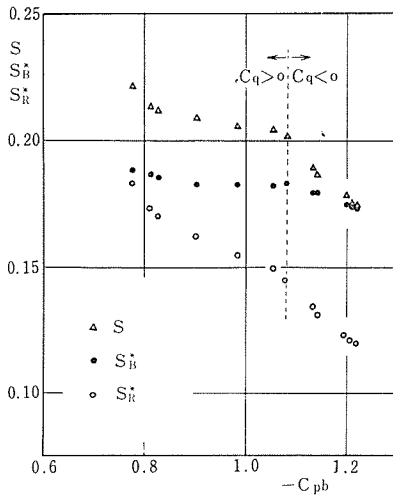


図11 S , S_B^* , S_R^* と C_{pb} との関係

物体から少し離れた後流の構造は、物体の形状に関係なくほぼ相似になるという実験事実から、 d と U の代りに後流の特徴的な寸法と速度で置き換えて作った後流 Strouhal 数 S^* なるものを定義し、後流を統一的に理解しようとする試みが多くの研究者によって提唱されている。

これらの中で最も著名なものは、Roshko の提案したもので、

$$S_R^* = \frac{fd'}{U_s}$$

で表わされるものである。ここに U_s は剝離点における自由流線上の速度、 d' は自由流線の幅を表わす。Roshko は円柱、 90° くさび

形、垂直平板について実験し、 $S_R^* \doteq 0.16$ となることを示した¹⁾²⁾。

これに対して Bearman (1967)⁵⁾ は splitter plate や吹出しなど、後流に干渉がある場合は、必ずしも S_R^* が一定にならないことを示し、新しい後流 Strouhal 数

$$S_B^* = \frac{fb}{U_s}$$

を提案した。ここに b は Kármán 渦列の幅で、Kronauer の安定条件を用いて計算されるものである。

図11には S から計算した S_R^* と S_B^* の値も同時に示してある。これで見ると、やはり S_R^* は吹出し・吸込みの場合でひどく値が食い違いますが、一方 S_B^* の方はほぼ一定値 $S_B^* \doteq 0.18$ を取り Bearman の結果と一致している。ただし、吹出し・吸込みがあまり強い場合には、この値から少しずれてくる。

5. む す び

円柱の後流に吹出し・吸込みを与えた場合、前者は後流の圧力を上昇させると同時に、極小圧力点の位置を後方へ押しやる働きがあり、後者はその逆である。その結果、圧力抵抗は吹出しの場合に減少し、吸込みの場合に増加する。

Strouhal 数は吹出しに対して増加、吸込みに対して減少するが、Beaman の後流 Strouhal 数 S_B^* に換算すると、すべての場合にわたってほぼ一定値 $S_B^* = 0.18$ をとる。これに対して Roshko の後流 Strouhal 数 S_R^* は値のばらつきが大きく、統一的なパラメータとしては不適當であることが分る。

C_q による剝離角の変化、渦の形成の機構、後流の空間的構造、吹出し・吸込み面積を変えた場合の効果の違いなどの問題は今後に残されている。

最後に、本実験を行なうにあたって、卒研究生井戸明則、北原初男の両君から多大の協力を得たことを感謝する。

参 考 文 献

- 1) A. Roshko : On the Drag and Shedding Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies, NACA TN 3169 (1954).
- 2) A. Roshko : On the Wake and Drag of Bluff Bodies, J. Aero. Sci., Vol.22, pp 124-132 (1955).
- 3) C. J. Wood : The Effect of Base Bleed on a Periodic Wake, J. R. Aero. Soc., Vol.68, pp 477-482 (1964).
- 4) P. W. Bearman : The Effect of Base Bleed on the Flow behind a Two-Dimensional Model with a Blunt Trailing Edge, Aero. Quart., Vol.18, pp 207-224 (1967).
- 5) P. W. Bearman : On Vortex Street Wakes, J. Fluid Mech., Vol.28, pp 625-641 (1967).

Summary

The Effect of Base-Bleed and Suction on the Wake of a Circular Cylinder. I

Haruhiko TAKADA and Hideo KURASAWA

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

Measurements are made of the pressure distribution around a circular cylinder and along the wake centerline, together with the vortex shedding frequency on the flow of Reynolds number (based on cylinder diameter) of 3.1×10^4 . In case of a base-bleed, the base pressure rises and Strouhal number increases, whereas in case of a base suction, the base pressure drops and Strouhal number decreases. It is found that Bearman's wake Strouhal number takes nearly a constant value of 0.18 in all the cases tested, while Roshko's wake Strouhal number can not be constant.