円柱表面圧力測定における圧力孔の寸法効果*

八木田 幹^{*1}, 高橋 理^{*2}Static Hole Size Effects on Surface Pressure
Distributions of a Circular Cylinder

Miki YAGITA and Tadasu TAKAHASHI

The surface pressure distributions of a circular cylinder as a model with large streamwise pressure gradients were measured for various static pressure hole diameters and depths in incompressible laminar flow. The error of pressure measurements is proportional to the hole diameter and not affected by the depth within the experimental regions. Simple and available formulae of correction are proposed for the Reynolds number range between 5×10^3 and 1.5×10^4 . It is expected that the range is extended to about 2×10^5 , where Newton's drag law is applicable. The formulae of correction may be developed into the surface pressure of a sphere or a cone placed on a plate.

Key Words: Fluid Dynamics, Flow Measurements, Pressure Distribution, Hole Size Effects, Circular Cylinder

1. 緒 言

最近, 小形低速風洞を用いて, 円柱や球, 円すいなどの表面圧力分布の測定を行った実験を見掛けるが, 供試体の大きさに比べ, 表面静圧孔の直径がかなり大きなものがある。小形風洞における気流境界の影響を少なくするための模型の小形化やまた, 速度ベクトル測定に用いられる円柱形および球形多孔ピトー管におけるプローブとしての小形化が, 圧力孔の影響を大きなものにしている。圧力孔は小さいほうが圧力孔周りの流れ場に与える影響も小さく, 測定の分解能も上がると思われるが, 実際に小さな圧力孔をあける場合の工作上的問題とか, 測定時のタイムラグを考えると, 圧力孔はある程度大きいほうが都合がよい。

静圧孔を用いた圧力測定における誤差 (Static pressure hole error problem) については多くの研究がなされており, 各種の圧力測定に関する従来の研究をまとめたものに Chue⁽¹⁾の論文がある。これによると非圧縮性流れでは, 流れ方向の圧力こう配が極めて小さな管内流れについて, 管壁にあげられた圧力孔の寸法・

形状についてその影響を調べたものが主であることがわかる。一方, 円柱や球のまわりの流れのように, 物体表面に沿って流れ方向の圧力こう配が急な場合について, 圧力孔の大きさが測定値に与える影響に関する研究は, 圧縮性流れではかなり見られるが⁽²⁾⁻⁽⁴⁾非圧縮性流れではわずかに Ducruet-Dymment⁽⁵⁾のものがあるにすぎない。Ducruet-Dymment は定常非圧縮性流れについて圧力測定値に及ぼす圧力孔の影響を詳細に検討し, 境界層, 圧力こう配および壁の曲率の影響を d/θ と t/d の関数として層流と乱流の場合について求めている。しかし, さまざまな形状をもつ物体の圧力測定値に対して一般的に適用できる修正式を示そうとしたため, その修正方法は極めて煩雑である。

本研究は円柱まわりの非圧縮性層流境界層流れに関して, 円柱の表面圧力測定値に及ぼす圧力孔の直径, 深さおよびレイノルズ数の影響を実験的に調べ, 測定値に対する圧力孔の直径の影響を修正する簡潔な修正式を求めたものである。

記 号

 C_1, C_2 : 定数 d : 圧力孔の直径 D : 円柱直径

* 原稿受付 平成元年9月20日。

^{*1} 正員, 東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。^{*2} 東京工業大学大学院。

$K(\theta)$: 比例係数

P_s : 円柱表面圧力

$P_{s\infty}$: 主流静圧

t : 圧力孔の深さ

U_∞ : 主流速度

θ : 前方分岐点から円柱周方向の角度

Θ : 運動量厚さ

C_p : 圧力係数 $= (P_s - P_{s\infty}) / (1/2 \rho U_\infty^2)$

C_D : 圧力抵抗係数 $= \int_0^\pi C_p \cos \theta d\theta$

Re : レイノルズ数 $= DU_\infty / \nu$

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。風洞は250 mm 角の正方形吹出口をもつ開放式ブローダウン形であり、供試体の円柱は吹出し口から230 mm のところに流れに直角にターンテーブルに取付けられている。また円柱まわりの流れの二次元性を確保するため、風洞気流のコア境界の内側に入る位置に2枚の端板を取付けた。端板は厚さ1 mm の黄銅板で作られており、その直径は円柱直径の7倍(105 mm)⁽⁶⁾とし、端板間距離は200 mm とした。また端板の前縁は両側からくさび状に仕上げて流れのはく離を防いでいる。

供試体の円柱は外径15 mm の引抜黄銅管で、肉厚0.5 mm と1.0 mm の2種類を用いた。黄銅管の表面は1200 メッシュの紙やすりで研磨したが旋盤による機械仕上げは行っていない。最大直径と最小直径の差は8 μ m であった。

表面圧力測定用の圧力孔は円管中央に1箇所、管壁に垂直にあげられており、表面にばりが残らぬよう注意深く仕上げている。圧力孔の深さは管壁の肉厚 t に等しく、圧力は圧力孔から円管中空部を経て円管下端より圧力計に導かれるようになっている。円柱直径が小さな供試体ではこのような圧力測定方法が一般に採用されていると思われるので、ここでも実際に即した方法を用いることにした。圧力孔の深さ t の影響を求める実験では、表1に示すように円管肉厚を変化させたが、 $t=0.5, 1.0$ mm 以外は円管の肉厚を機械加工により薄くするか、リングを内側にはめ込んで t を変えている。その場合、円管は中央より13 mm ずれた位置で二分割され上下円柱をはめ込むことによって接続できようになっている。なお、その他の実験条件も表1にまとめておいた。圧力孔の直径は光学顕微鏡による写真撮影により1/100 mm の精度で求めており、一例を図2に示した。圧力測定にあたっては、始めに圧力孔を油粘土でふさぎ圧力の漏れがないことを確認し

た後、油粘土を取り除きターンテーブルを5° おきに回転しながら、 $\theta = -45^\circ$ から 185° までの円柱表面圧力を測定した。圧力計にはゲッチングン形微圧計を用いたが、精度はアルコール柱で0.05 mm である。また風洞の主流速度は円柱の影響を受けない上流部に取付けたピトー管により測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧力孔の深さの影響 本研究は円柱まわりの流れに限定(球および平板上の円すいへの拡張は可

表1 実験条件

$D=15.0\text{mm}, t=0.50\text{mm}$							$Re=$ 5.0×10^3 $\sim$ 1.5×10^4
d_{mm}	0.34	0.54	0.74	1.07	1.97	2.95	
d/D	0.023	0.036	0.049	0.071	0.131	0.197	
t/d	1.47	0.926	0.676	0.467	0.254	0.169	
$D=15.0\text{mm}, d/D=0.049$							
t_{mm}	0.21	0.31	0.50	1.01	1.52		
t/d	0.284	0.419	0.676	1.36	2.05		
$D=15.0\text{mm}, d/D=0.131$							
t_{mm}	0.50	2.02	4.05				
t/d	0.254	1.03	2.06

図1 実験装置

図2 圧力孔の光学顕微鏡写真 ($d=0.54\text{mm}$)

能と考えるが) し、簡潔な修正式を求めることを目的としているので、Ducruet-Dymont⁽⁶⁾のように境界層、圧力こう配および壁の曲率の影響を個別にとらえることはせず、 t/d 、 d/D 、 Re 数が圧力測定値に及ぼす影響を直接調べたものである。これらのうち、 t/d と d/D を独立に変化させて実験を行うのは、多数の供試体と実験回数を必要とするので、始めに予備実験として $Re=5 \times 10^3$ と 1.5×10^4 について $d/D=$ を 0.023 から 0.197 まで変化させて実験を行った。このとき、 t/d は 0.17 から 1.47 までの範囲にある(表 1 参照)。得られた表面圧力分布 C_p の一部を図 3 と図 4 とに示す。測定値を図に示すにあたり、測定時の $\theta=0^\circ$ と実際のよどみ点の位置を修正するため、 $\theta=-40^\circ$ から 40° までの測定値を用いて最小二乗法により圧力分布の放物線近似を行い、その軸をよどみ点の位置とした。

得られたすべての圧力分布について、 $\theta=-40^\circ$ から 80° までの圧力分布を六次の多項式で近似し、一例として各寸法の圧力孔で得られた $\theta=40^\circ$ における C_p の値を示したのが図 5 である。 C_p の値は d の増加とともに直線的に増加しており、 $d=0$ の C_p の値が圧力孔の影響のない真の値を示すと言える。しかし、この図 5 における測定値には t/d の影響が含まれた

ままであり、そこで比較的 d/D が小さな場合として $d/D=0.049$ 、大きな場合として $d/D=0.131$ を選び、 d/D を固定して t/d の影響を求めた。

t/d を変えた場合の圧力分布の測定結果の一例を図 6 に示す。また図 5 と同様に $\theta=40^\circ$ における C_p に対する t/d の影響を示したのが図 7 である。 d/D が小さい 0.049 の場合、 $Re=5 \times 10^3$ 、 1.5×10^4 とともに t/d の影響は $0.28 < t/d < 2.1$ の範囲でほとんどないといえる。 d/D が大きい 0.131 の場合、 t/d が小さいとこ

図 5 圧力孔の直径の影響

図 3 円柱表面圧力分布

図 6 円柱表面圧力分布

図 4 円柱表面圧力分布

図 7 圧力孔の深さの影響

ろでわずかに C_p の値が大きくなる。以上の結果より、本実験の範囲内の t/d に対して t/d の影響はほぼ無視できると考え、図5に示した結果には t/d の影響は含まれていないとした。

3・2 圧力孔の直径と Re 数の影響 3・1節の結果より、表1に示した実験条件においては t/d の影響が無視できると考え、 d/D を6とおりに変え、 $Re=5 \times 10^3, 1.0 \times 10^4, 1.5 \times 10^4$ の3とおりについて表面圧力の測定を行った。得られた圧力分布について、前と同様に $\theta = -40^\circ$ から 80° までを六次の多項式で近似し、 C_p に対する d/D の影響をおおの θ についてその一例を $Re=1.5 \times 10^4$ について示したのが図8である。この図8より $\theta=0 \sim 70^\circ$ の範囲で修正値 ΔC_p は

$$\Delta C_p = C_p - C_{p0} = K(\theta) \cdot (d/D) \dots\dots\dots (1)$$

と表せることがわかる。ここで、 C_{p0} は $d \rightarrow 0$ における C_p の値で真の C_p の値である。 $K(\theta)$ は比例係数で θ の関数であるが、圧力こう配 $dC_p/d\theta$ の影響を主に表す係数である。

図8の直線のこう配より $K(\theta)$ を求め、図9に示したが、圧力こう配が最も大きくなる $\theta=40^\circ$ 付近で $K(\theta)$ は最大となり、圧力こう配が零となる $\theta=0^\circ$ と 70° 付近で $K(\theta)$ は零となる。この図9には同様にして求めた $Re=5 \times 10^3$ と 1.0×10^4 の結果も示してあるが、これらの Re 数の範囲では Re 数による相違はほとんどない。 $K(\theta)$ は圧力こう配の影響と考えると、ポテンシャル流れにおける円柱表面圧力分布から $K(\theta) \sim \sin 2\theta$ が予想されるが、はく離に伴う圧力分布の変化のため、 $K(\theta)$ は対称な分布とならず $C_1 \sin C_2 \theta$ で

は表せない。ここでは $K(\theta)$ を次のような三次式で近似した。

$$K(\theta) = -1.33 \times 10^{-5} \theta (\theta - 70) (\theta + 32.5) \dots (2)$$

ただし、 $0 < \theta < 70^\circ$ の範囲である。式(2)は $0 < \theta < 15^\circ$ の範囲で実測値より多少高めとなるが、この範囲は修正値がもともと小さな値となるところなのでその影響は極めて少ない。したがって式(1)は

$$\Delta C_p = -1.33 \times 10^{-5} \theta (\theta - 70) (\theta + 32.5) \cdot (d/D) \dots\dots\dots (3)$$

となる。

図3と図4に示した圧力分布から明らかなように、 $0 < \theta < 70^\circ$ の範囲では圧力孔 d の増加につれ C_p の値は増加するが、 $70^\circ < \theta < 110^\circ$ の範囲では逆に d の増加につれ C_p は減少し、 $110^\circ < \theta < 180^\circ$ の範囲では d の影響は極めて小さくなることがわかる。 $\theta=70^\circ$ 付近を境にして d の影響の仕方が逆になるが、その θ の位置は多少 Re 数に依存している。 $70^\circ < \theta < 110^\circ$ の範囲における $K(\theta)$ も同様な方法で求めようとしたが、 $0 < \theta < 70^\circ$ の場合と異なり、かなりデータのばらつきが大きい。そこで図4より、 $K(\theta)$ は 70° および 110° でほぼ零となり、中間の 90° で最大値をとると考えて、次式のような二次式で近似した。

$$K(\theta) = 2.25 \times 10^{-3} (\theta - 90)^2 - 0.9 \dots\dots\dots (4)$$

したがって、修正値 ΔC_p は

$$\Delta C_p = [2.25 \times 10^{-3} (\theta - 90)^2 - 0.9] (d/D) \dots (5)$$

ただし、 θ の適用範囲は $70 \sim 110^\circ$ である。

3・3 修正式による修正結果 3・2節で求めた修正式(3)、(5)を用いて、図4に示した圧力分布を修

図8 圧力孔の直径の影響

図9 比例係数 $K(\theta)$

図 10 修正された円柱表面圧力分布

正した結果が図 10 である。各寸法の d を用いて得られた C_p の測定値は式 (3), (5) により修正され, $0^\circ < \theta < 70^\circ$ の範囲では非常によい一致を見せており, $70^\circ < \theta < 110^\circ$ の範囲では多少の差は残るがかなり修正されていることから, これらの式が簡潔で優れた修正式であることがわかる。これらの式の適用できる Re 数の範囲は約 5×10^3 からニュートン抵抗則があてはまる約 2×10^5 まで拡張できると考えられる。

次に, 圧力抵抗係数 C_D の d/D による変化を図 11 に示すが, 図 5 の C_p と d/D の関係と同様に, C_D は d/D の増加とともに直線的に増加しており, Re によらず直線のこう配はほぼ等しい。図 11 より直線のこう配を求め C_D に対する修正式を求めると次式となる。

$$C_{D0} = C_D - 0.625(d/D) \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお, $d/D=0$ の位置に Wieselsberger による測定結果⁽⁷⁾ も示したが, 粘性抵抗 $C_{Df} = 4Re^{-1/2}$ ⁽⁸⁾ を差引いた値である。

4. 結 言

円柱まわりの非圧縮性層流境界層流れに関して, 円柱の表面圧力測定値に及ぼす圧力孔の直径, 深さおよびレイノルズ数の影響を実験的に調べ, $0.023 < d/D$

図 11 圧力抵抗係数に及ぼす圧力孔の直径の影響

$< 0.2, 0.25 < t/d < 2.1, 5 \times 10^3 < Re < 1.5 \times 10^4$ の範囲に対して, 圧力孔の直径による影響を修正する極めて簡潔で有効な修正式を提示した。

また, レイノルズ数の範囲はニュートン抵抗則があてはまる約 2×10^5 まで拡張できると考えられ, さらに円柱と類似な表面圧力分布をもつ球や平板上の円すいまわりの圧力分布に対する修正式を考えるうえで参考になるものと言える。

文 献

- (1) Chue, S. H., *Prog. Aerosp. Sci.*, **16-2** (1975), 147.
- (2) Morrison, D. F., Sheppard, L. M. and Williams, M. J., *J. R. Aeronaut. Soc.*, **71**-676 (1967), 317.
- (3) Rainbird, W. J., *Q. Bull.*, Division of Mechanical Engineering and the National Aeronautical Establishment (Canada), Rep. No. DME/NAE, 1967(3), (1967), 55.
- (4) Pugh, P. G., Peto, J. W. and Ward, L. C., *NPL Aero Rep.*, 1313, ARC 31, 900, (1970).
- (5) Ducruet, C. and Dymont, A., *J. Fluid Mech.*, **142** (1984), 251.
- (6) Stansby, P. K., *Aeronaut. J.*, (1974), 36.
- (7) Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, 7th Ed., (1979), 17, McGraw-Hill.
- (8) Goldstein, S., *Modern Developments in Fluid Dynamics*, **2** (1957), 425, Oxford.