

# 琉球大学学術リポジトリ

## 模型試験における風洞壁面の干渉

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学理工学部 公開日: 2012-05-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 真栄田, 義才, Maeda, Gisai メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/24494">http://hdl.handle.net/20.500.12000/24494</a>

# 模型試験における風洞壁面の干渉<sup>†</sup>

真 栄 田 義 才\*

## Some Problem for wall Interference Correction in wind Tunnel Testing

Gisai MAEDA

Wall interference problems in wind tunnel testing were discussed by many people. These are enough to correct the effect of wall interference for usual model testing, if there is a enough interval between the walls. But there are some problems. One of them is for limitation that we can use these methods. On this paper, I report some experimental data concerning with this problem.

Experiments were done in the two dimensional wind tunnel. A testing model is circular cylinder which has 24mm for diameter and 200mm for longitudinal dimension. The walls of tunnel are movable between 60mm to 350mm for wall interval. All testing were done at the same Reynold's Number, i.e.,  $U_0 d / \nu = 4 \times 10^4$ . The result shows as follow;

When  $H/d$ , a ratio between wall interval  $H$  and a diameter of circular cylinder,  $d$ , takes above 5.0, drag coefficient of the cylinder is constant, if the experimental data are corrected for the effect of wall interference.

For the ratio below 5.0, drag coefficient increases gradually with decreasing the ratio, although correction is made for interference.

### 1. まえがき

風洞を用いての模型試験において、風洞壁面が物体まわりの流れに及ぼす影響については、これまで数多くの研究報告がなされており、特に、低速風洞における壁面干渉の問題については、理論的及び実験的な修正方法が確立されていると云えよう。しかしながら、これらの修正方法は壁面間隔に比して模型が充分小さいばあいは問題ないが、模型が大きく、壁面の影響を強く受けるばあいも適用し得るであろうか。即、模型の大きさを壁面間隔に対し、どの程度まで大きくし得るのかについては不明な点が多い。

こゝでは矩形断面を持つ風洞内の二次元流れを考え

ることとする。模型として円柱を用い、円柱に作用する抵抗を測定し、壁面による干渉を考慮して測定値を修正する。円柱の直径と壁面間隔の比を種々変えて試験し、修正値が一定値を保つのはどの範囲までかを実験的に調べた。修正は模型、後流、及び風洞壁面に沿う境界層による阻塞効果を考慮して、円柱のところの速度を修正する方法によった。

円柱抗力の測定には動ひずみ計を用いたが、これと壁面に沿う圧力分布を測定し、円柱の上下流における圧力降下よりその抗力を求め比較してある。なお、後流分布測定より、Jonesの方法を用いて抗力を求めた結果、前二者の測定値がほぼ一致しているのに対し、このばあいは差異があり、特に壁面間隔が小さいときは開きが大きく、いくつかの疑問点が残されたので、今回は報告から除外することにした。

<sup>†</sup>1971年9月30日受付

\*琉球大学理工学部機械工学科

(記号)

以下の本稿で使用される記号は次の通りである。

- H : 平行二壁面の間隔
- a : 円柱の半径
- W : 複素ポテンシャル
- $Z = \phi + i\psi$  : 複素数  $= x + iy$
- i : 虚数単位  $= \sqrt{-1}$
- v : 誘導速度
- $\epsilon$  : 一様流の速度修正要素
- $P_0$  : 円柱前方の一様流の圧力
- P : 円柱面上の圧力
- $C_p$  : 圧力係数
- $= \frac{2(P - P_0)}{\rho U_0^2}$

x : 円柱の中心を通り流れの方向へ取った座標軸

$U_\infty$  : 壁面干渉を考慮して修正された一様流の速度  $= U_0(1 + \epsilon_m + \epsilon_w + \epsilon_b)$

y : 流れの平面内において x に直角な座標軸

d : 円柱の直径  $= 2a$

m : 模型

b : 境界層

W : 後流

$\psi$  : 流れの函数

$U_0$  : 一様流の速度

m : 吹出しの強さ

$\delta^*$  : 排除厚さ

2. 模型, 後流, 境界層による阻塞効果

平行二平板間の中央に流れに直角に円柱があるばあいの流れは鏡像の理を用いて、虚軸上に距離Hの等間隔で無限に並ぶ同じ強さの二重吹出しと一様流を組み合せることにより得られる。即、図1のような円柱の

無限配列を考えればよい。従って、その複素ポテンシャルは

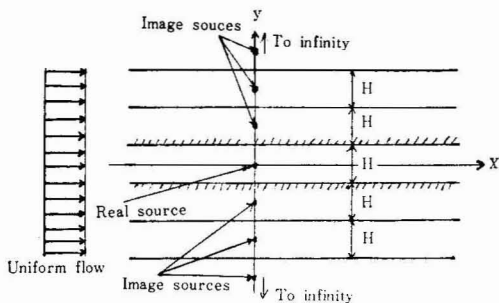
$$W = U_0 Z + U_0 a^2 \left\{ \frac{1}{Z} + \left( \frac{1}{Z - iH} + \frac{1}{Z - 2iH} + \dots \right) + \left( \frac{1}{Z + iH} + \frac{1}{Z + 2iH} + \dots \right) \right\} = U_0 Z + U_0 a^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{Z + inH}$$

即、 $W(Z) = U_0 Z + \frac{\pi}{H} U_0 a^2 \coth \frac{\pi Z}{H} \dots (1)$

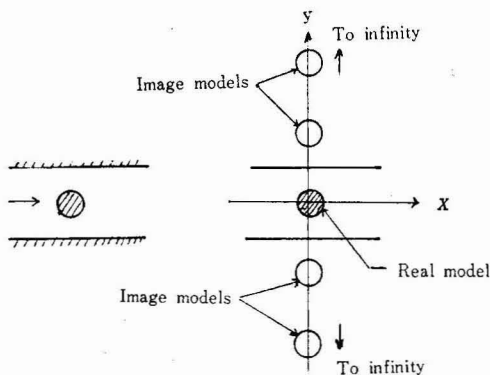
従って、その速度ポテンシャル、流れの函数はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \phi &= U_0 x + \frac{\pi U_0 a^2}{H} \frac{\sinh \frac{2\pi}{H} x}{\cosh \frac{2\pi}{H} x - \cos \frac{2\pi}{H} y} \\ \psi &= U_0 y - \frac{\pi U_0 a^2}{H} \frac{\sin \frac{2\pi}{H} y}{\cosh \frac{2\pi}{H} x - \cos \frac{2\pi}{H} y} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

次に、後流を強さ  $m_w$  の吹出しで置きかえ、平行二平面間の中央にこの  $m_w$  の吹出しがあるばあいの流れは、やはり鏡像の理を用いて、虚軸上に同じ強さの吹



Fig, 2



Fig, 1

出しが等間隔で無限に配列する形で得られる。よって、その複素ポテンシャルは

$$\begin{aligned} W(Z) &= \sum_{n=0}^{\infty} m_w \ln(Z + inH) + \sum_{n=1}^{\infty} m_w \ln(Z - inH) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} m_w \ln(Z + inH) \\ &= m_w \ln \sinh \frac{\pi Z}{H} \dots (3) \end{aligned}$$

従って、その速度ポテンシャル、流れの函数はそれぞれ、

$$\phi = m_w \ln \left( \sinh \frac{\pi x}{H} \cos \frac{\pi y}{H} \right),$$

$$\psi = m_w \ln \left( \cosh \frac{\pi x}{H} \sin \frac{\pi y}{H} \right) \dots \dots \dots (4)$$

後流による阻塞効果によって誘導される速度を考えるばあいには、これと一様流れを組み合せればよい。

更に境界層による排除厚さを考えるに、両壁面に強さ  $m_b$  の吹出しをおくことにより、それによって誘導される速度が得られる。距離  $H$  だけ離れた平行二平面上にそれぞれ同じ強さの吹出しがあるばあいの複素ポテンシャルは同様に、

$$W(Z) = m_b \ln \sinh \frac{\pi Z}{H} \dots \dots \dots (5)$$

となり、後流のばあいと同じ形となる。

以上によって壁面が存在するばあい、模型のところでは流れは増速され、無限に広がる一様流れの中に一本の円柱があるばあいに較べて

$$U_o \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{a}{H} \right)^2 + \frac{\pi m_w}{H} + \frac{\pi m_b}{H}$$

$$= V_m + V_w + V_b \dots \dots \dots (6)$$

だけ速度が増すことになる。この式において、第1項目は模型によって誘導される速度、第2項目は後流、第3項目は両壁面の境界層によってそれぞれ誘導される速度である。

吹出しの強さ  $m_w$ ,  $m_b$  については、後流及び境界層による排除厚さに相当するものを  $\delta_w^*$ ,  $\delta_b^*$  とおくと、

$$m_w = \frac{U_o \delta_w^*}{2\pi}, \quad m_b = \frac{U_o \delta_b^*}{2\pi} \dots \dots \dots (7)$$

の関係があり、従って

$$\frac{\pi m_w}{H} = V_w = \frac{U_o \delta_w^*}{2H}, \quad \frac{\pi m_b}{H} = V_b$$

$$= \frac{U_o \delta_b^*}{2H} \dots \dots \dots (8)$$

となる。後流による誘導速度については、これを

$$\frac{V_w}{U_o} = \frac{\delta_w^*}{2H} = \epsilon_w = \eta \frac{d}{H} \dots \dots \dots (9)$$

と表わすと、実験の結果、円柱については  $\eta \approx 0.3$  である。

境界層については実測によってその排除厚さを求めた。そこで、

$$\frac{\pi^2}{3} \left( \frac{a}{H} \right)^2 = \epsilon_m, \quad \frac{\delta_b^*}{2H} = \epsilon_b$$

とおくと、風洞壁の存在によって円柱のところでは誘導される速度は  $U_o (\epsilon_m + \epsilon_w + \epsilon_b)$  であるから、これに相当する境界のない二次元流れの一様流速は

$$U_\infty = U_o (1 + \epsilon_m + \epsilon_w + \epsilon_b) \dots \dots \dots (10)$$

となる。

### 3. 試験装置及び方法

図3に試験装置の概略図を示す。整流部は  $1\text{mm}^2$  の目をもつ整流網4枚が  $300\text{mm}$  おきに配列されて

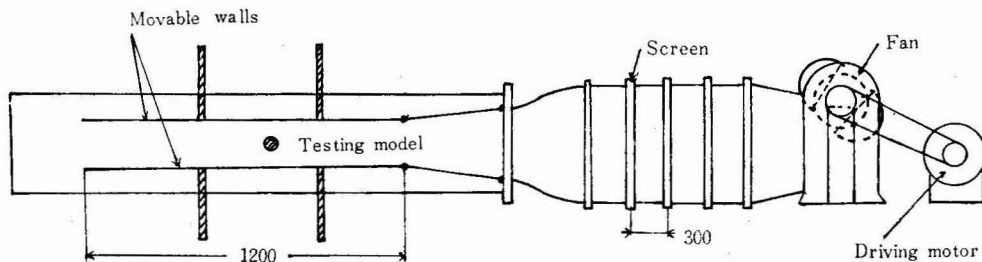


Fig. 3 Schematic diagram of testing apparatus

いて、その断面は  $500 \times 500\text{mm}^2$  の正方形である。これを  $200 \times 400\text{mm}^2$  に絞り、上下壁はそれぞれ幅  $200\text{mm}$ 、長さ  $1200\text{mm}$  の測定部壁面板にチョウツガイで接続される。測定部における上下壁面は厚手の合成板を用い、マサツを少くし、また乱れを生じせしめないために流れに接する面には滑らかなデコラがはり付

けてある。この上下壁面は、その間隔を自由に変えられるようにした、いわゆる可動板である。また上下共その壁面に沿う圧力分布を測定するためそれぞれ21個の静圧測定孔が設けてあり、これらは斜管マンメータに連結される。上下壁間隔の調整可能な範囲は最大  $360\text{mm}$  までである。また左右の側壁は透明なサンロ

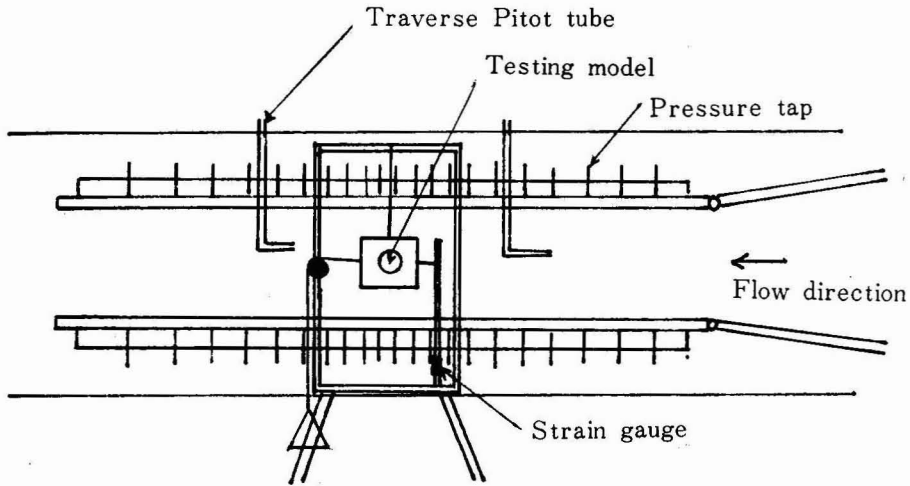


Fig. 4 Observation part of the apparatus

イド板を用い、その間隔は200mmに固定してある。測定部の詳細については図4に示してある。

円柱抗力の測定は当初、後流分布測定により求めたが、バラツキがあり、この実験においては正確な抗力の測定をしなければ意味をなさないで、動ひずみ計を用いて直接測定することにした。円柱に作用する一様流方向の力とひずみ計の読みの関係は予め分銅により求めてある。抗力の測定後、再び両者の関係を調べ、実験の前後において動ひずみ計の読みに差異が生じていないことを確認した。

次に、測定された上下壁に沿う圧力分布より円柱の上下流の間で起きた圧力降下を知り、これによって別に抗力を求め、ひずみ計による測定結果と比較した。

実験に先立ち、測定部の流れが充分整流されているかどうか、また円柱を挿入しても測定部において、流れの二次元性が保たれているかどうかを確かめた後試験した。

試験に用いた円柱は直径24mm、長さ200mmの真鍮棒である。円柱の取付け位置は長さ1200mmの一定断面、直線流路のほぼ中央である。円柱の中央に直径0.8mmの静圧測定孔を設け、 $10^\circ$ 間隔で円柱表面の静圧分布を測定した。測定に際し、左右両壁面の間隔 $b$ は一定に保たれ $b/d=3.34$ である。上下壁（円柱軸に

平行）の間隔は種々に変えられ、最大 $H/d=15$ から最小2.6の範囲で試験した。壁面間隔比 $H/d$ を変えると測定部における流速が変わるので、送風機から送られる風量を調節し、一般流の流速が一定になるようにした。

試験は主として一般流の流速 $U_0=25.5$  m/sec、レイノルズ数 $Re=U_0 d/\nu=4 \times 10^4$ で行い、その他に $H/d=3.75$ 、及び7.5について $Re=1.2 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$ の範囲で流速を変えて試験したが、この範囲においては、円柱表面に沿う境界層内の流れはいずれも層流である。

#### 4. 試験結果

図5及び図6は試験流路における断面の速度分布を示す。境界層の部分を除いては断面内の速度は一定になっており、充分整流されていることがわかる。下流側に向って僅かながら流速が増しているようである。これは断面積の不均由るものではなく、風洞吐出し口は大気中へ開放されているので下流側へ向って僅かに圧力が降下し、それだけ流速が増加することになる。その他に境界層の排除厚さの増加も考えられるが、それは殆んど影響を与える程のものではない。

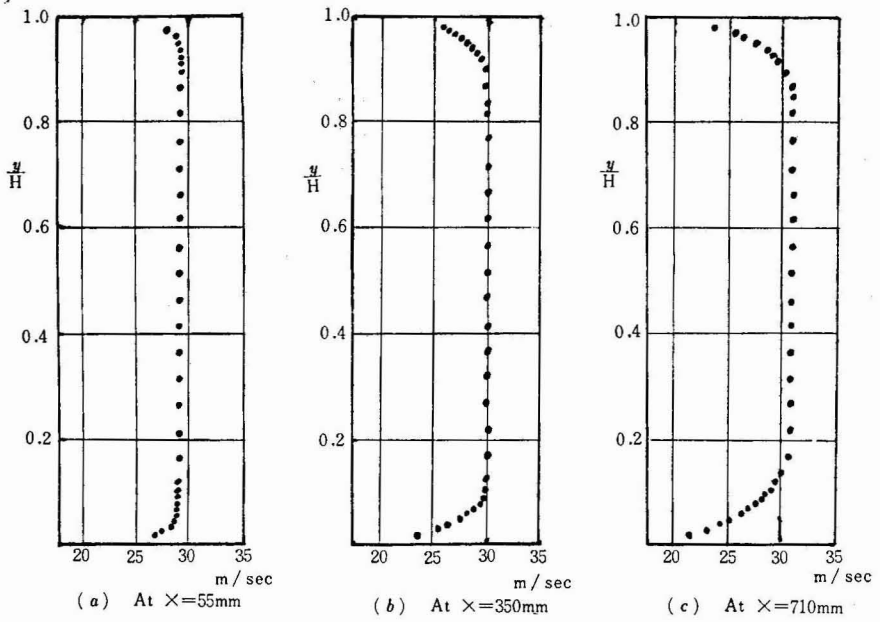


Fig. 5 Velocity distributions at the test sections where  $H = 100mm$

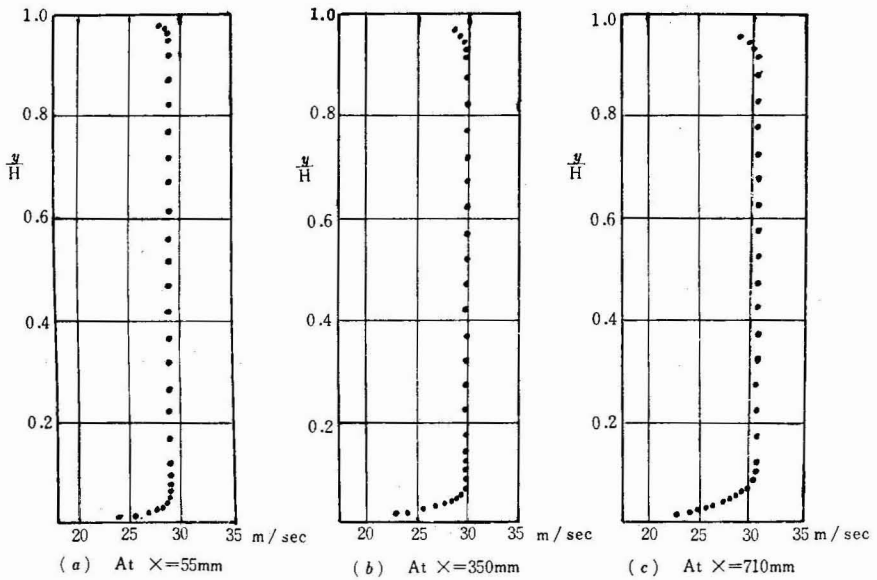


Fig. 6 Velocity distributions at the test sections where  $H = 200mm$

図7は円柱表面の圧力分布を示すもので、図に示した試験ではレイノルズ数は約  $4 \times 10^4$  の一定に保たれている。このレイノルズ数においては、勿論境界層内の流れは層流である。壁面間隔が小さくなるにつれて円柱面上の速度が増し、圧力がそれだけ降下してゆく

ことになる。しかし、円柱後半部における圧力回復の様子は、 $H/d$ の減少によって下の方へずれてゆくだけで、殆んど差異は認められない。本図には示していないが、壁面間隔が更に狭まり、 $H/d=2.6$ になっても最小圧力がさらに降下するだけで ( $C_{pmin} \approx -2.8$ )

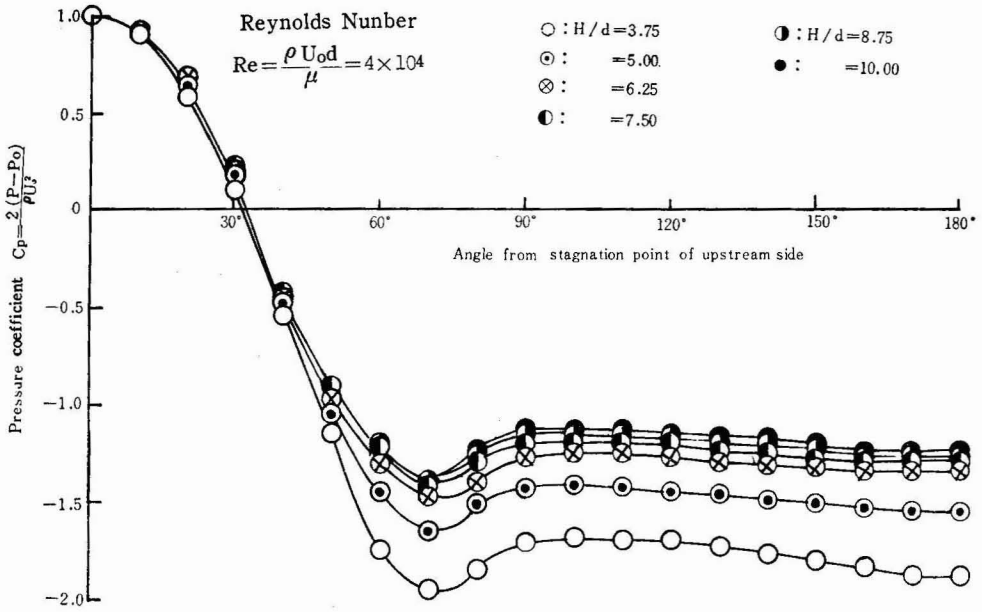


Fig. 7 Pressure distributions along cylinder surface

その後の圧力回復は図に示したのと同じ傾向である。

図8と図9はそれぞれ  $H/d = 7.5$  及び  $3.75$  についてレイノルズ数を  $(1.2 \sim 8.0) \times 10^4$  の間で変化させて

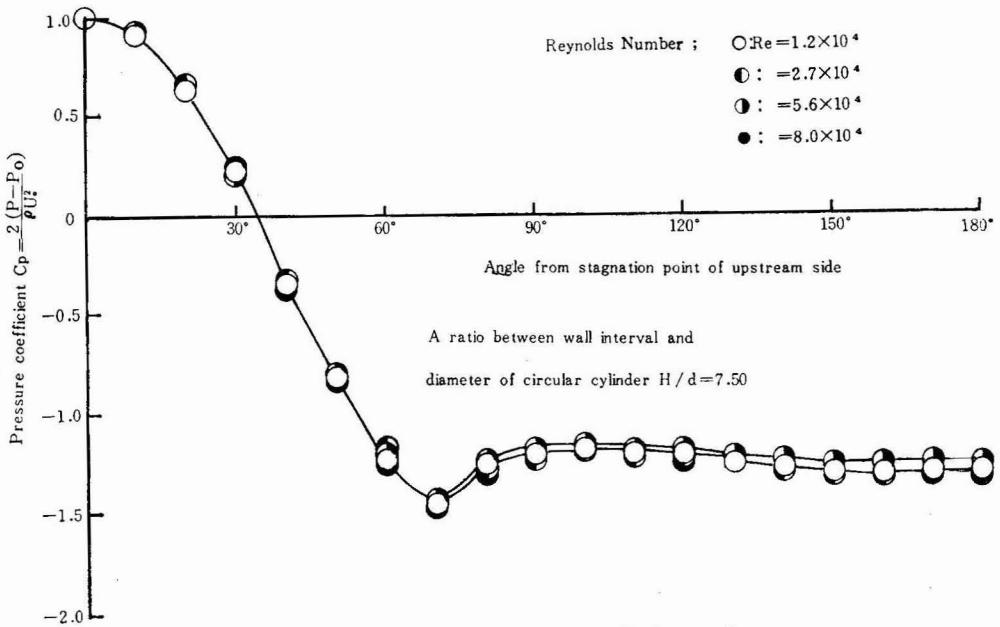


Fig. 8 Pressure distributions along cylinder surface

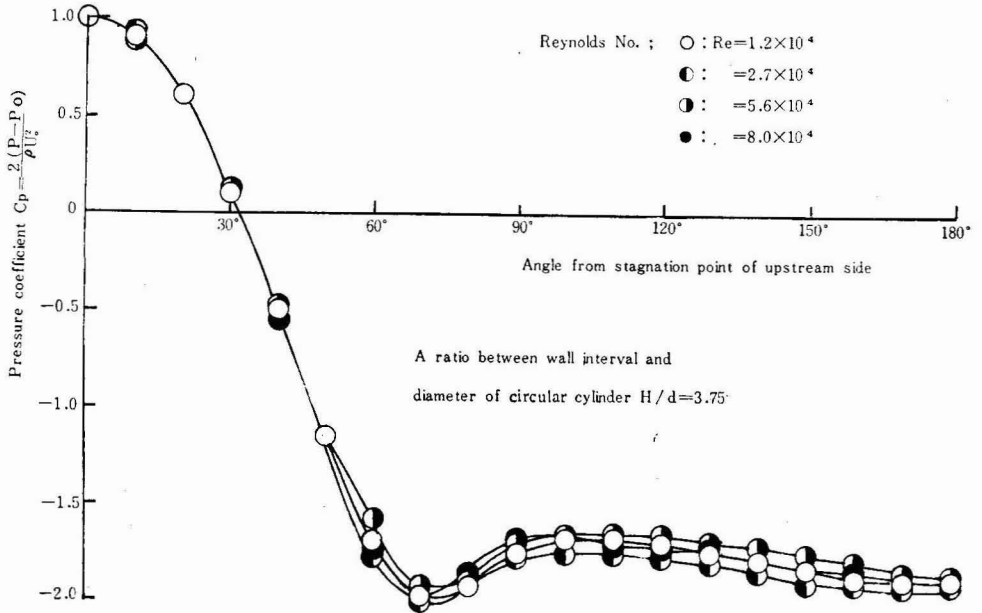


Fig. 9 Pressure distributions along cylinder surface

圧力分布を調べた結果である。この範囲のレイノルズ数においては、境界層はすべて層流で、かつ円柱の抗力係数もほぼ一定値を保つ領域であるから圧力分布も変化しない筈である。図8 ( $H/d=7.5$ ) においては各レイノルズ数に対する圧力分布が殆んど一致している。しかし、図9 ( $H/d=3.75$ ) においてはレイノルズ数によって幾分かの変動がみられる。即、壁面間隔比  $H/d$  が小さくなるといくらか不安定になってくるようである。

$H/d > 15$  ならば後流による影響のみを考慮すれば充分のようである。しかし、壁面間隔比が小さくなると模型による阻塞効果が急に増し、 $H/d$  が約 2.7 以下になると逆に模型の影響が後流のそれを上まわる。流路壁面に沿う境界層排除厚さによる影響は一般に小さく、壁面間隔比がきわめて小さいばあいを除いては、模型と後流による阻塞効果のみを考慮すれば充分のようと思われる。

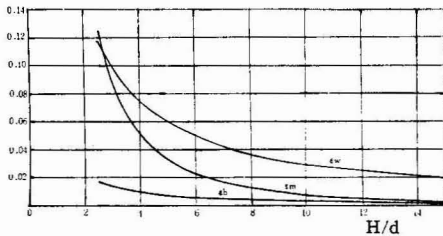


Fig. 10 Corrector factor for wall interference  
 $\epsilon_m$  : for model interference  
 $\epsilon_w$  : for wake interference  
 $\epsilon_b$  : for boundary layer interference

図10は第3節で示した一様流の修正要素  $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_w$  及び  $\epsilon_b$  を試験速度の  $U_0 = 25.5 \text{ m/sec}$  について示したものである。壁面間隔比  $H/d$  が大きいときは後流による阻塞効果が主なもので他の要素は小さく、

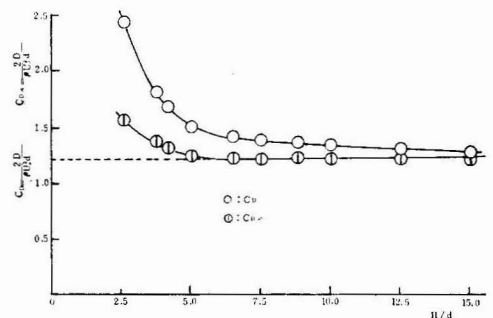


Fig. 11 Drag coefficient of circular cylinder measured by strain gauge

図11には実測の抗力係数（実測の円柱前方の流速によって求めたもの）と壁面の干渉を考慮して測定値を



修正して求めた抗力係数を同時に示してある。実測値は壁面間隔比H/dの減少と共に漸次増大し、H/dが5以下になると急に大きくなってゆく。これに対し、干渉を考慮して修正した抗力係数はほぼ一定値を示しているが（約1.2）、H/dが小さくなると増大する。修

正によって一定値を示す限界はH/dが約5程度である。それ以下の壁面間隔比では実測の抗力係数が急に増し、前述のような方法で修正してもその修正値に壁面の影響が残ることになる。

図12は壁面に沿う圧力分布を示したものである。上

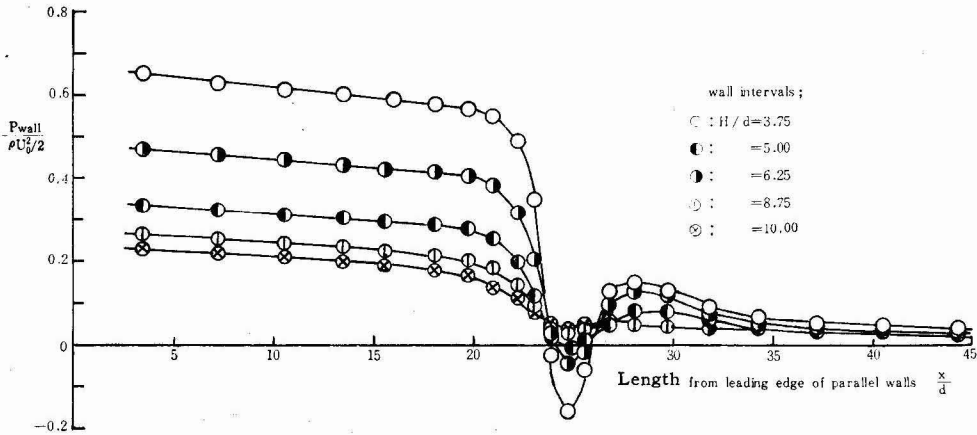


Fig. 12 Pressure distributions along walls

下壁面、別々にその圧力分布を測定したが、両者は殆んど一致したので片側についてのみ示してある。円柱の上流側と下流側では大きな圧力差があるが、これは円柱の抵抗によってヘッドが失われるためである。壁面間隔比が大きければ円柱のところで失われる圧力も小さく、また、下流側における圧力回復も殆んどなく、壁面摩擦と体積膨張によって徐々に圧力が降下してゆく。壁面間隔比が小さくなるにつれて、円柱のところで失われる圧力エネルギーは飛躍的に増し、その圧力分布は円柱のところで著しく降下した後、再び上昇し、その後更に降下してから一定の割合で圧力が下る段階へと移る。

壁面に沿う圧力分布を測定し、円柱のところで失われた圧力ヘッドを知ることができれば、これより円柱に作用する抵抗を求めることができる。即、図13において上流側の圧力をP<sub>1</sub>、下流側の圧力をP<sub>2</sub>とする。その差

$$P_1 - P_2 = \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_d$$

とおく。ここにΔP<sub>f</sub>は円柱がないばあいの断面1、2間の圧力降下、ΔP<sub>d</sub>は円柱の存在によって失われた圧力である。τ<sub>w</sub>を壁面マサツ応力とし、断面1、2間の距離をℓとすると、マサツ応力は単位幅当たりについてτ<sub>w</sub>ℓである。よって、力のつり合い条件は

$$(P_1 - P_2) H = (\Delta P_f + \Delta P_d) H$$

$$H = D + \tau_w \ell \dots \dots \dots (10)$$

断面1、2間の体積変化を無視すれば、明らかにΔP<sub>f</sub> H = τ<sub>w</sub> ℓであるから、円柱の受ける抵抗Dは

$$D = C_D \frac{\rho}{2} U_0^2 d = \Delta P_d H \dots \dots \dots (12)$$

となる。これによって求めた抗力係数を図14に示す。図には動ひずみ計によって測定した抗力係数との比が示してある。両者の間に3%前後の差はあるが、比較的よく一致していると云えよう。しかし、壁面間隔比が小さくなると差異が大きくなるように思われる。

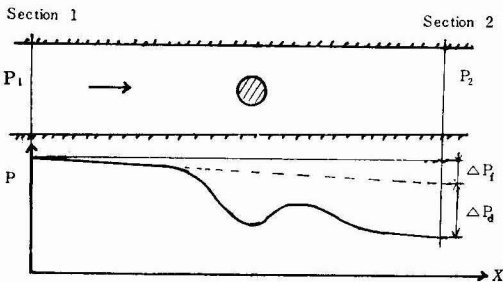


Fig. 13 Pressure drop by the model

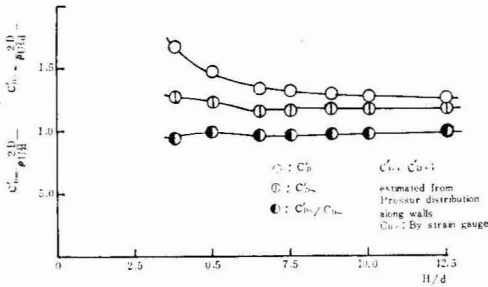


Fig. 14 Drag coefficient of circular cylinder estimated from pressure drop along walls

5. あとがき

固定壁を有する二次元風洞内での模型試験において、模型、後流、及び壁面境界層による阻塞効果を考慮して円柱のところの速度を修正する方法について、その適用し得る限界を実験的に調べてきた。ここでは、模型として二次元円柱のみを取り上げた。

円柱に対する壁面間隔比H/dが5以上であれば速度のみを修正することにより、円柱の抗力は無限に広がる二次元流れの中の円柱のそれに大体等しくなる。し

かし、H/dが5以下になると速度のみの修正では壁面の影響が残ることになる。即、壁面間隔比が小さくなるにつれて修正した抗力係数は大きくなる。

ここでは速度のみを修正したが、壁面圧力分布から明らかなように、壁面間隔比が小さくなると壁面に沿う圧力勾配が大きくなり、それを考慮して修正しなければならない。しかるばあいは適用範囲が幾らか広がるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 例えば, H. Glauert, A. R. C. R. & M. No. 1566 (1933)
- 2) 神元五郎: 水力学Ⅱ, 共立出版 P. 377 (1959)
- 3) 村田, 小川, 三宅: 空気力学実験法, 朝倉書店, P. 253 (1969)
- 4) V. Streeter, Fluid Dynamics, Mcgraw-Hill, P. 116 (1948)
- 5) W. Hughes and J. Brighton, Theory and Problems of Fluid Dynamics, Mograw-Hill, P. 131 (1967)
- 6) H.Glauert, 上記論文