

# 自然通風式冷却塔の空気力学的模型実験\*

— 平均圧力および抗力 —

谷口清一\*\*

熊野順一\*\*\*

清水茂保\*\*\*\*

坂本弘志\*\*\*\*\*

(昭和55年3月28日受理)

## Aerodynamic Characteristics of Models of Natural Draft Cooling Towers

—Pressure distribution and pressure drag—

by Seiichi TANIGUCHI, Junichi KUMANO, Shigeyasu SHIMIZU  
and Hiroshi SAKAMOTO

Models of natural draft cooling towers were made, in the form of circular shells with ventilation at their bases. Measurements of the pressure distribution on them were taken varying the ventilation height  $H$  and the aspect ratio  $h/d$ , where  $d$  is the diameter of the model tower and  $h$  is the height of the tower.

The inside pressure distributions of the model tower are almost constant in spite of variation of the ventilation height. Moreover, it is found that the pressure drag has its maximum value at  $H/d \cong 0.125$  and becomes constant in the range  $H/d \geq 0.4$  for each aspect ratio.

### 1. 緒 論

平面壁上に存在する三次元的物体周辺の流れは、物体周辺に形成される馬蹄型うず、アーチ型うずをはじめとして、三次元はく離、後流の構造など物理的に興味深い問題を提出する。また、工学的にも地表面に建設される構造物に関する風圧力の評価、荒さ要素としての特性、ボルトエクスジェネレータの性能評価に関連して重要な問題の一つとなっている。

著者らは、三次元物体として代表的なものと考えられる直立円柱周辺の流れに関して、継

\* 日本機械学会道支部第21期総会講演会(昭55-3)にて発表

\*\* 応用機械工学科

\*\*\* 日青青梅電子工業株式会社

\*\*\*\* 東芝エンジニアリング株式会社

\*\*\*\*\* 機械工学科

続した研究を行っているが、その基本的な結果はつぎのようになる。単一の直立円柱が乱流境界層内にある場合、直径と高さが等しい円柱の抗力係数は近寄り流れが保有する無次元平均動圧と一次関数の関係にある<sup>1)</sup>。また、直径と高さが異なる円柱の抗力係数は円柱高さ  $h$  と境界層厚さ  $\delta$  とから作られる無次元量  $h/\delta$  のべき関数になる<sup>2)</sup> ことが明らかにされている。さらに、直立二円柱の相互干渉に関しては、直立二円柱の間げきが小さくなるに従って、干渉力としての揚力が顕著になる<sup>3),4)</sup> ことが明らかにされている。

円柱構造物には薄いシェルで構成された円筒形状の冷却塔や浮屋根式のタンクなどがあり、これらの構造物は強度上剛性が低く、強風下における耐風性能の評価<sup>5),6)</sup> が設計・施工に際して必要になる。特に、自然通風式の冷却塔の下部が吹き抜けの構造になっており、冷却塔に作用する流体力は、この吹き抜け部の大きさによって変化することも考えられる。冷却塔に作用する風圧力を支配するものとしては、上記の吹き抜け部の大きさの他に、スラブによる表面荒さ、アスペクト比（タワーの高さと直径との比）、近寄り流れの速度および乱れ度などが考えられる。しかし、これらの諸因子をすべて取り上げて系統的な研究を行うには、ばく大な時間と経費を必要とするために2~3個のパラメータに関する風圧力の測定<sup>7),8)</sup> が行われているにすぎない。

本研究は、直立円柱周辺流れの拡張として、吹き抜け部を有する円筒構造物を自然通風式冷却塔の模型として取り上げ、当該円柱を風洞測定部床面上に設置し、円筒の吹き抜け部の高さおよびアスペクト比をそれぞれ変化させて、円筒の内側表面および外側表面上の圧力を測定したものである。また、これらの圧力値を積分することによって、円筒に作用する抗力を算定して、抗力と吹き抜け部の高さおよびアスペクト比との関連性を明

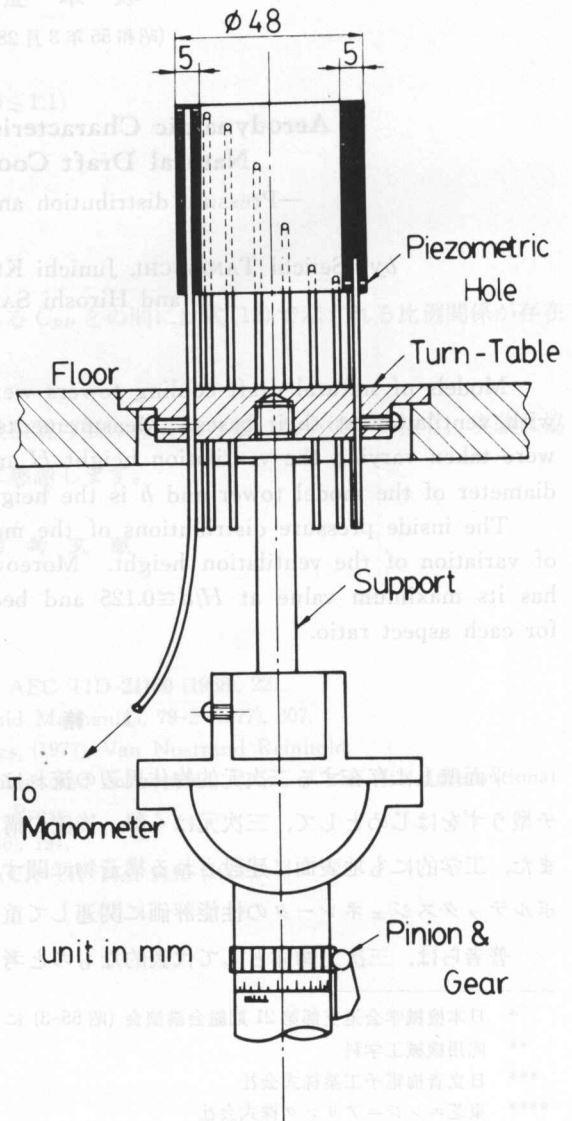


図1 円筒の設置状態

らかにしてある。さらに、油膜法による壁面流れの可視化観測を行うことによって、吹き抜け部の高さの変化による、円筒周辺に形成されるうず系の変化を調べてある。

## 2. 実験装置および方法

実験に用いた風胴は既報<sup>9)</sup>に示したものと同一なので省略する。供試円筒は図1に示すように、肉厚5 mm、外径  $d=48$  mm の表面がなめらかなアクリル製のシェルより作られ、円筒の内および外表面には複数個の圧力孔(直径0.5 mm)が適当な間隔で設けられている。円筒の吹き抜け部には、直径1.3 mmの直ちゅう製パイプが円筒肉厚部の中心に  $10^\circ$  間隔で計36本取り付けられている。また、円筒吹き抜け部の高さの設定は、これらの支柱をスライドさせて行う。

実験では、円筒を風胴測定部入口から950 mm下流に設置し、主流速度  $U_0$  を16 m/sの一定値に保持した。さらに、円筒のアスペクト比  $h/d$  ( $h$ : 円筒部の高さ) を0.5~2.0の範囲で7通りに、吹き抜け部の無次元高さ  $H/d$  ( $H$ : 吹き抜け部の高さ) を0.042~1.25の範囲で15通りに変化させた。なお、座標の定義と主な記号を図2に示す。

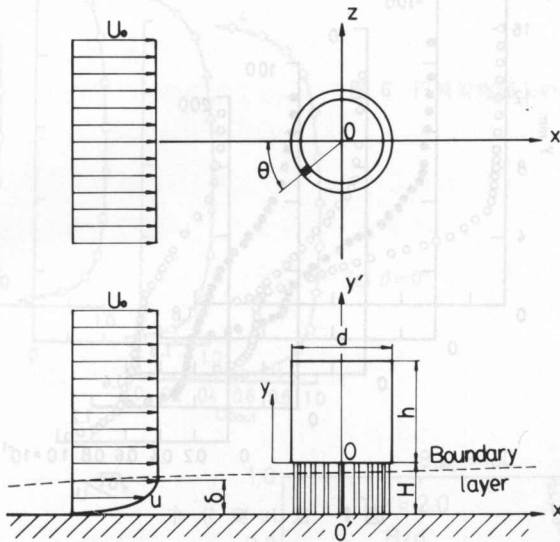


図2 主な記号および座標の定義

## 3. 流れの特性

本実験では、境界層の影響をできるだけ少ない状態で、円筒に作用する流体力と円筒のアスペクト比  $h/d$  および吹き抜け部の高さ  $H/d$  との関連性を明らかにすることを主目的としているので、円筒設置予定位置での境界層厚さは比較的薄い状態のものを採用した。図3に示す円筒設置予定位置の境界層厚さは約9 mmであり、 $H/d \geq 0.19$  の範囲では円筒底面が境界層厚

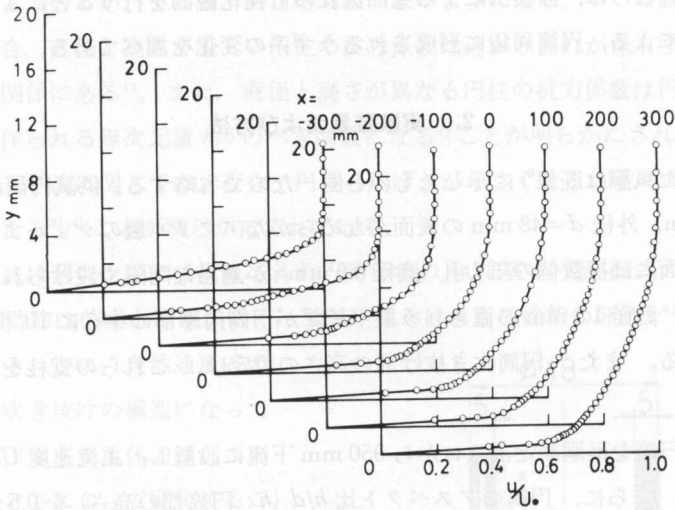


図3 速度分布

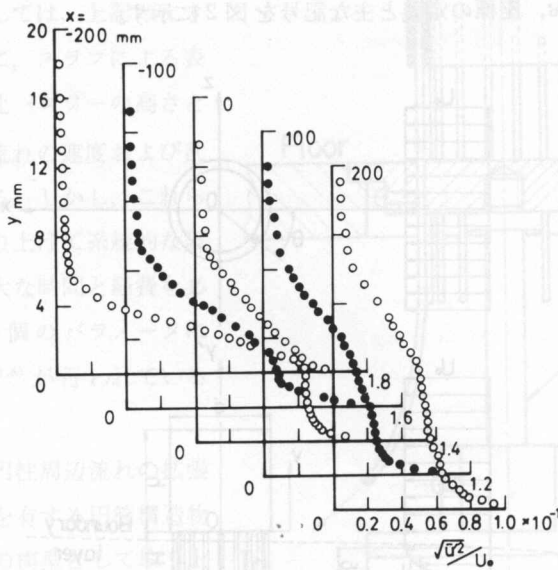


図4 乱れ度分布

さ  $\delta$  を越えることとなる。図4には境界層内の乱れ分布  $\sqrt{u'^2}/U_0$  を示してあるが、乱れ度は境界層内で大きな値を有するものの、境界層厚さを越えると急速に減少することが認められる。なお、主流の乱れ度は主流速度  $U_0$  の約0.2%である。

#### 4. 圧力分布

##### 4.1 円筒外表面上の圧力分布

図5(a), (b), (c) はアスペクト比  $h/d=1$  の円筒外表面の圧力分布を圧力係数  $cp [(p-p_0)/$

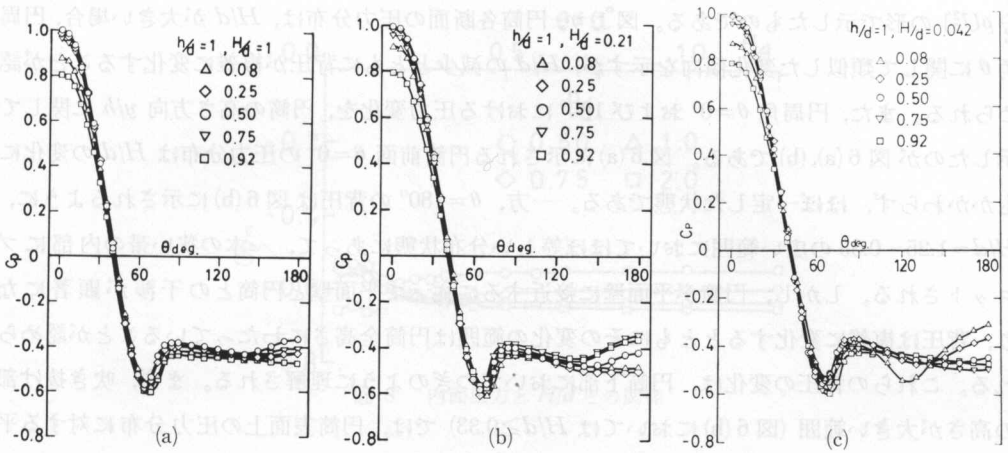


図5 円筒外表面上の圧力分布 (図中の数字は  $y/h$  を表す)

(a)  $H/d=1$ , (b)  $H/d=0.21$ , (c)  $H/d=0.042$

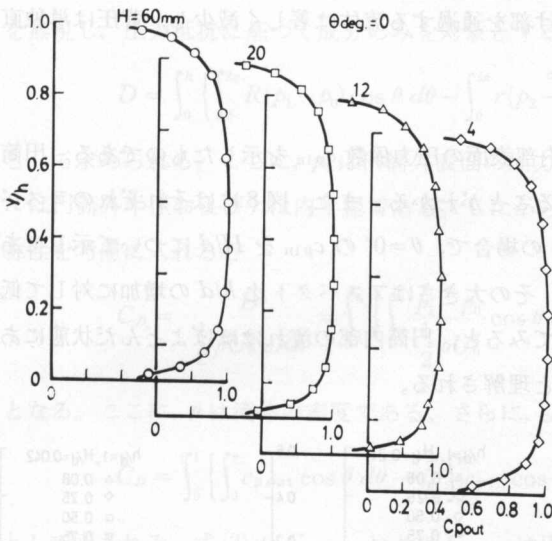
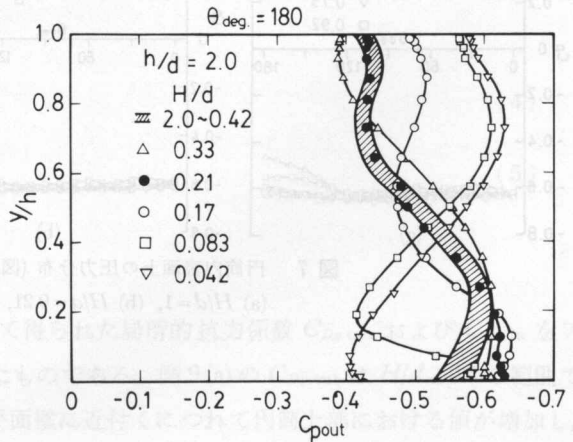


図6 円筒対称面上の圧力分布

(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 180^\circ$

$\frac{1}{2}\rho U_0^2$  の形で示したものである。図より、円筒各断面の圧力分布は、 $H/d$  が大きい場合、円周角  $\theta$  に関して類似した変化傾向を示すが、 $H/d$  の減少とともに背圧が複雑に変化することが認められる。また、円周角  $\theta=0^\circ$  および  $180^\circ$  における圧力変化を、円筒の高さ方向  $y/h$  に関して示したのが図 6(a),(b) である。図 6(a) に示される円筒前面  $\theta=0^\circ$  の圧力分布は  $H/d$  の変化にもかかわらず、ほぼ一定した状態である。一方、 $\theta=180^\circ$  の背圧は図 6(b) に示されるように、 $H/d=1.25\sim 0.33$  の広い範囲においてほぼ等しい分布状態にあって、一本の狭い帯の内部にプロットされる。しかし、円筒が平面壁に接近するに従って平面壁と円筒との干渉が顕著になり、背圧は複雑に変化するとともにその変化の範囲は円筒全高さにわたっていることが認められる。これらの背圧の変化は、円筒下部においてつぎのように理解される。まず、吹き抜け部の高さ大きい範囲 (図 6(b) においては  $H/d \geq 0.33$ ) では、円筒表面上の圧力分布に対する平面壁の干渉による影響はほぼ無視し得る程度であると考えられる。しかし、 $H/d$  の減少とともに吹き抜け部を通過する流体は平面壁と円筒底部との間で縮流し、その結果背圧は低下する。さらに円筒が平面壁に接近すると、吹き抜け部を通過する流体は著しく減少し、背圧は単独直立円柱の場合<sup>10)</sup> に類似した分布状態になる。

#### 4.2 円筒内面上の圧力分布

図 7 は、円筒 (アスペクト比  $h/d=1$ ) 内部表面の圧力係数  $c_{p\text{in}}$  を示したものである。円筒内部の圧力は図よりほぼ一定した値を有することがわかる。また、図 8 にはそれぞれのアスペクト比に関して、円筒中央部高さ  $y/h=0.5$  の場合で、 $\theta=0^\circ$  の  $c_{p\text{in}}$  を  $H/d$  について示してある。 $c_{p\text{in}}$  は  $H/d \geq 0.4$  で一定した値となり、その大きさはアスペクト比  $h/d$  の増加に対して低下する傾向を示している。これらを総合してみると、円筒内部の流れはほぼよんだ状態にあり、その結果圧力に大きな変化がないものと理解される。

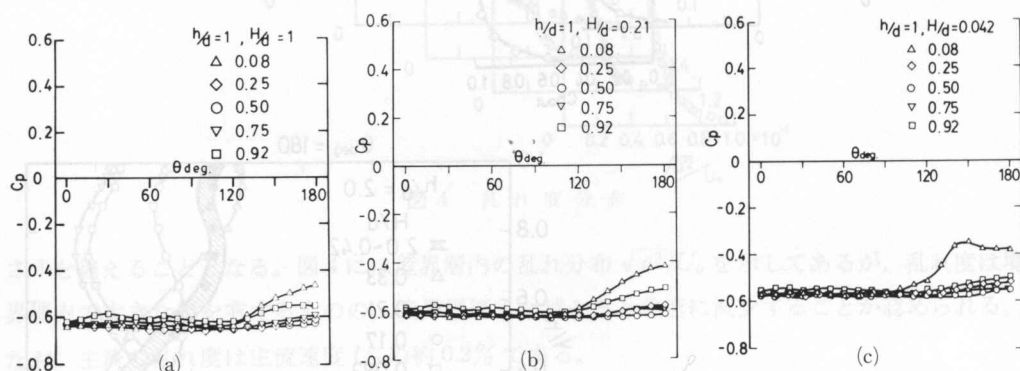


図 7 円筒内表面上の圧力分布 (図中の数字は  $y/h$  を表す)  
(a)  $H/d=1$ , (b)  $H/d=0.21$ , (c)  $H/d=0.042$

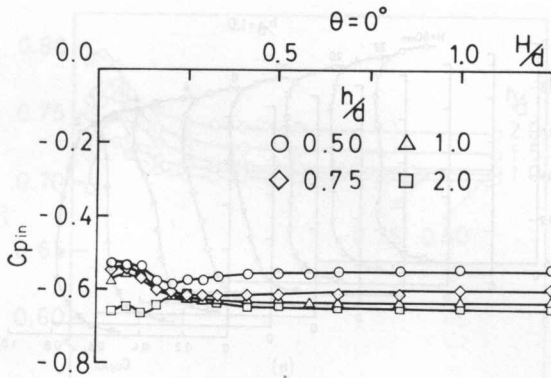


図8 内面圧力と  $H/d$  との関係

### 5. 円筒の抗力

円筒に作用する抗力は摩擦抵抗と圧力抵抗とからなるが、ここでは摩擦抵抗に基づく成分を無視し、圧力抵抗に基づく成分のみを対象とする。圧力に基づく抗力  $D$  は円筒に関して

$$D = \int_0^h \left\{ \int_0^{2\pi} R(p_1 - p_0) \cos \theta \, d\theta - \int_0^{2\pi} r(p_2 - p_0) \cos \theta \, d\theta \right\} dy \quad (1)$$

として求められる。ここに、 $p_1$  は円筒外表面の圧力、 $p_2$  は円筒内表面の圧力、 $p_0$  は主流の静圧、 $R$  は円筒外半径および  $r$  は内半径である。したがって、抗力係数  $C_D$  は  $x$  軸に関する流れの対称性を考慮に入れると

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 2Rh} = \int_0^h \left\{ \int_0^\pi \frac{p_1 - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \cos \theta \, d\theta - \frac{r}{R} \int_0^\pi \frac{p_2 - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \cos \theta \, d\theta \right\} \frac{dy}{h} \quad (2)$$

となる。ここに、 $\rho$  は流体の密度である。さらに、 $y^* = y/h$  とおくと  $C_D$  は

$$C_D = \int_0^1 \left\{ \int_0^\pi c_{p\,out} \cos \theta \, d\theta - \frac{r}{R} \int_0^\pi c_{p\,in} \cos \theta \, d\theta \right\} dy^* = \int_0^1 (C_{Dy\,out} + C_{Dy\,in}) \, dy^* \quad (3)$$

として表される。式(3)の  $C_{Dy\,out}$  および  $C_{Dy\,in}$  は円筒高さ  $y$  に作用する円筒外面および内面の局所的抗力係数であり、それぞれ

$$C_{Dy\,out} = \int_0^\pi c_{p\,out} \cos \theta \, d\theta \quad (4)$$

$$C_{Dy\,in} = -\frac{r}{R} \int_0^\pi c_{p\,in} \cos \theta \, d\theta \quad (5)$$

である。

#### 5.1 局所的抗力係数

図9(a), (b)は上記の計算方法によって得られた局所的抗力係数  $C_{Dy\,out}$  および  $C_{Dy\,in}$  をアスペクト比  $h/d=1$  の円筒に関して示したものである。図9(a)の  $C_{Dy\,out}$  は  $H/d \geq 0.4$  の範囲でほぼ一定した分布形状であるが、円筒が平面壁に近付くにつれて円筒上部における値が増加し、

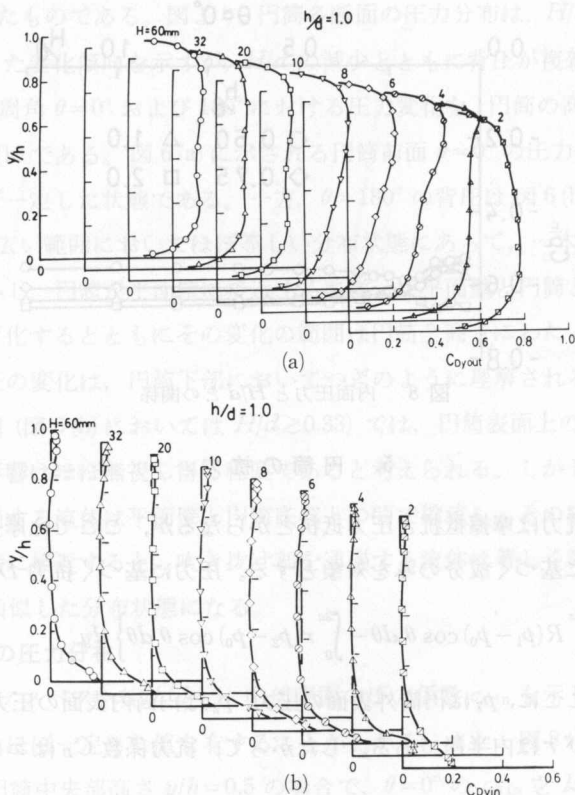


図9 局所的抗力係数

(a) 外面成分  $C_{Dy\ out}$ , (b) 内面成分  $C_{Dy\ in}$

$H/d=0.04$  においては逆に円筒下部の値が上部より大きくなる。また、図9(b)に示される円筒内側の局所的抗力係数  $C_{Dy\ in}$  は、高円筒のき  $0.2 \leq y/h \leq 1.0$  の範囲にわたってほぼ零の値を示し、 $C_{Dy\ in}$  の全抗力に対する寄与は小さいものであることが認められる。

## 5.2 抗力係数

図10(a)には抗力係数  $C_D$  を吹き抜け部の高さ  $H/d$  に関して示してある。 $C_D$  は  $H/d \geq 0.4$  の範囲では、それぞれのアスペクト比  $h/d$  に関しほぼ一定した値を有する。このことは、 $H/d \geq 0.4$  の  $C_D$  に対しては平面壁の干渉が小さいことと理解される。そこで、この  $C_D$  が一定となる範囲で、 $C_D$  と  $h/d$  との関係の求めてみると図10(b)のようになる。すなわち、円筒と平面壁との干渉がない範囲では、 $C_D$  は  $h/d$  の一次関数となり

$$C_D = 0.273(h/d) + 0.714 \quad (H/d \geq 0.4) \quad (6)$$

として表される。図10(b)には  $C_D$  を円筒外表面の抗力係数  $C_{D\ out}$  および円表面の抗力係数  $C_{D\ in}$  に分離して示してあるが、特に  $h/d$  が2程度になると  $C_{D\ in}$  は  $C_D$  の0.2%以下となる。したがって、 $h/d \geq 2$  の  $C_D$  に対しては内圧の寄与を無視してもよいと理解される。円筒が  $H/d \approx 0.4$  を越えて平面壁に接近すると、図10(a)に示すように  $C_D$  は順次増加し、 $H/d \approx 0.125$  で最大



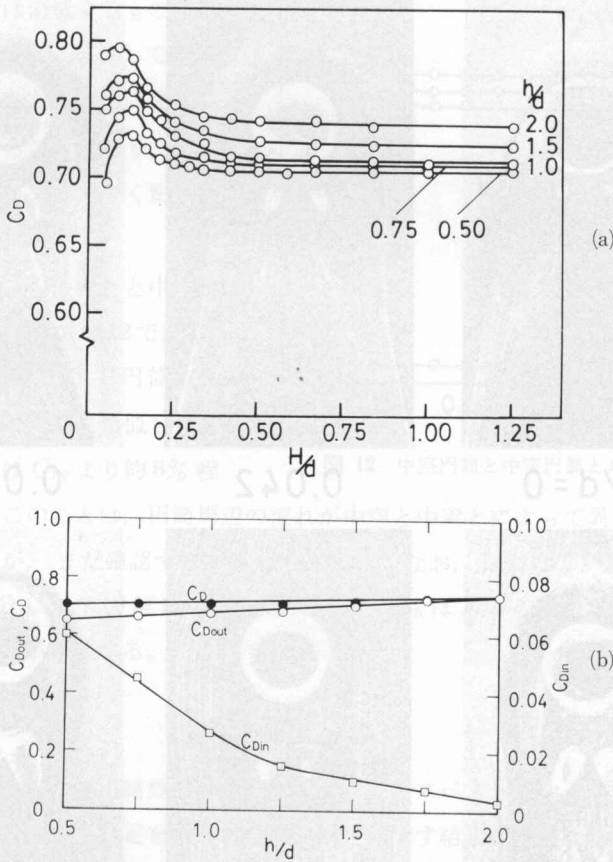


図 10 抗力係数

(a)  $C_D$  と  $H/d$  との関係, (b)  $H/d \geq 0.4$  における  $C_D$  の値

値  $C_{Dmax}$  に達する。この  $C_{Dmax}$  の値は  $H/d \geq 0.4$  の  $C_D$  より 6~7% 程度大きな値となる。

吹き抜け部の高さ  $H/d$  の減少による抗力の増加は、円筒と平面壁との干渉が大きく影響することと考えられるので、つぎに油膜法による円筒周辺流れの可視化観測結果について考察する。図 11 はアスペクト比  $h/d=1$  の円筒周辺の壁面流れを  $H/d$  の変化に関して観測したものである。 $H/d=0$  の場合、既報<sup>10)</sup> に示した円柱周辺の流れと同様に、円筒をとり囲むようにして馬蹄型のうずが認められ、さらに円筒背後にはアーチ型うずのつけ根に対応する双子うずが観測される。これら二種類のうずは、図に示されるように  $H/d$  の大きさによって大きく変化する。まず、双子うずは  $H/d$  の増加とともに下流方向へ移動し、 $H/d=0.83$  に到ってはうずのこん跡は存在しなくなる。このことは、 $H/d$  の増加によって円筒の吹き抜け部を通過する流体の速度が次第に大きくなりアーチ型うずが下流に流されるために生ずるものと考えられる。つぎに馬蹄型うずは円筒の存在によって誘起される上流側の逆圧力勾配に基づくものであるが、吹き抜け部の高さ  $H/d$  の増加とともに円筒下部を通過する流体は順次増加し、逆圧力勾配も低下する。その結果、図 12 の  $H/d \leq 0.25$  に示すように、円筒上流側におけるはく離はな

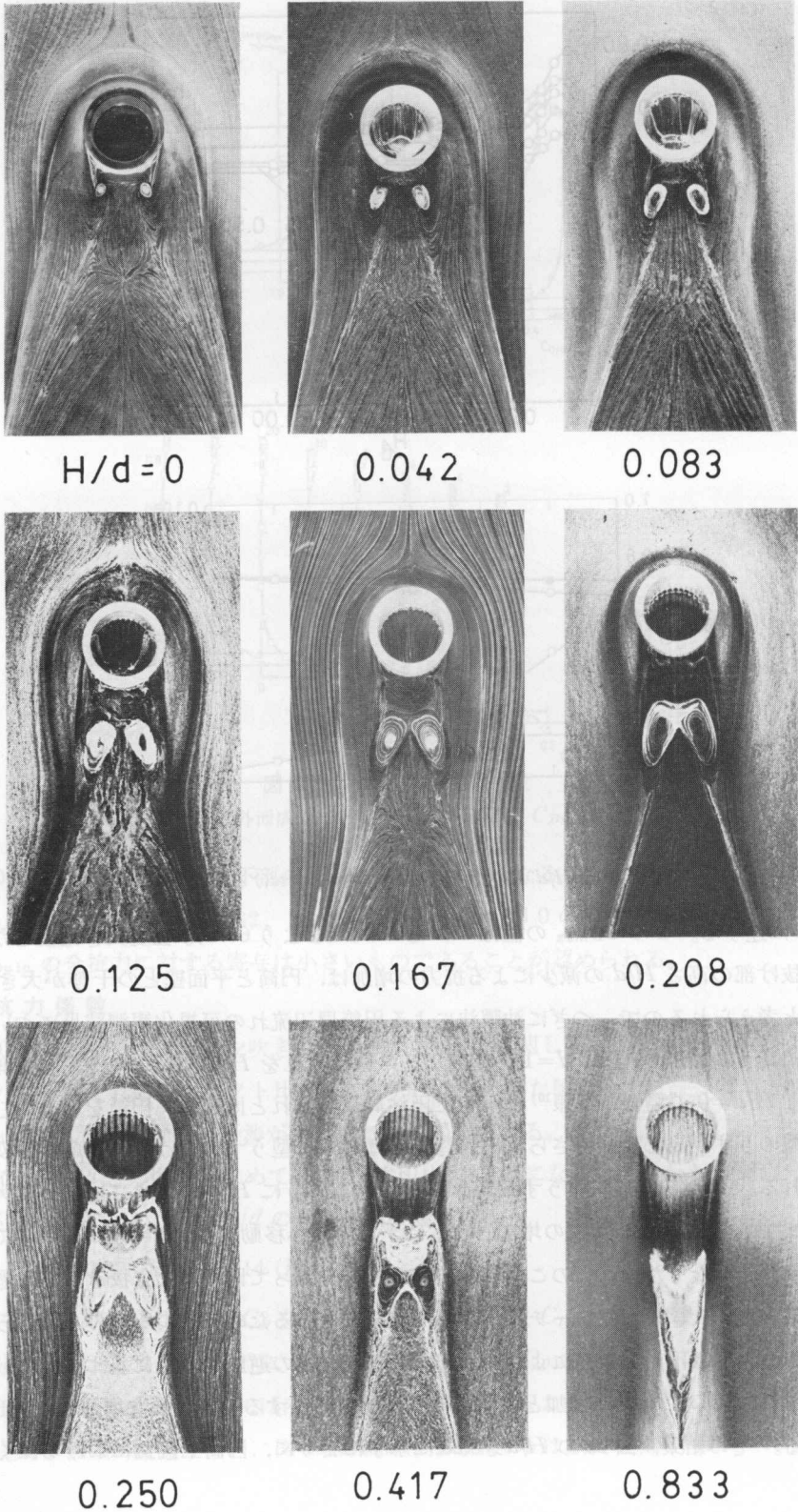


図 11 壁面流れ (油膜法)

くなり、馬蹄型うずは消滅するものと考  
えられる。以上のことを総合してみ  
ると、 $H/d$  の変化にもなって円筒周辺の  
流れは大きく変化することとなり、この  
ような流れの変化が抗力に大きく影響す  
るものと考えられる。

つぎに、円筒が中実の場合と中空の  
場合の抗力を比較したのが図12である。  
中空円筒の抗力係数  $C_D$  と中実円筒の抗  
力係数  $C_{D0}$  は、 $H/d$  に関して類似した変  
化傾向を有し、 $C_D$  は  $C_{D0}$  より約8%程  
度大きな値となる。このことは、円筒周辺の流れが中空と中実とによって異なることに起因す  
るものと考えられるが、まだ確認するに至っていない。なお、図には  $C_D$  を円筒の外面成分  
 $C_{Dout}$  および内面成分  $C_{Din}$  に分解して示してあるが、 $C_{Din}$  は  $H/d$  の変化にもかかわらず一定  
した値であることは注目に値する。

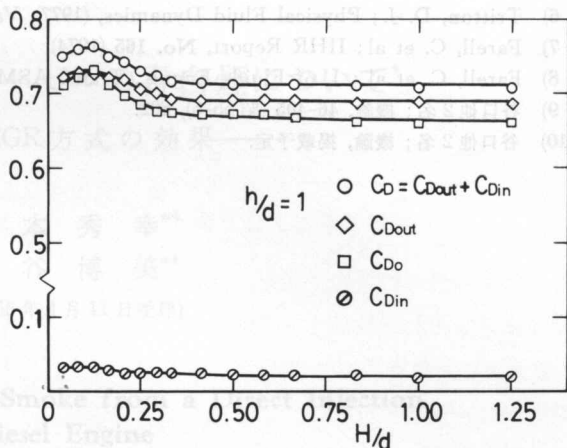


図12 中空円筒と中実円筒との抗力の比較

## 6. 結 論

平面壁上に設置した中空円筒周辺の流れに関して、アスペクト比および吹き抜け部の高さをそれぞれ変化させて詳細な測定を行った結果、以下に示す結論が得られた。

(1) 吹き抜け部の高さの変化に対して  $\theta=0^\circ$  の圧力分布は一定した値を保つが、背圧は  $H/d \leq 0.4$  の範囲で大きく変化し、その変化の範囲は円筒全高さにわたっている。

(2) 円筒内側の圧力は  $H/d$  の変化にもかかわらず、ほぼ一定した値を有する。

(3) 抗力は円筒と平面壁との干渉が小さいと考えられる  $H/d \geq 0.4$  の範囲では一定した値であるが、 $H/d$  の減少とともに増加し、 $H/d \approx 0.125$  に最大値を有する。

(4) 円筒周辺に形成されるうず系は  $H/d$  の変化とともに大きく変る。すなわち、 $H/d \geq 0.25$  で馬蹄型うずは消滅し、 $H/d \geq 0.83$  で円筒背後の双子うずが消滅する。

おわりに、実験装置の製作にご尽力頂いた小畑芳弘技官に感謝します。

## 文 献

- 1) 谷口他2名；機講論，No. 772-2 (昭52年)，81.
- 2) 谷口他2名；機講論，No. 790-15 (昭54年)，58.
- 3) 谷口他3名；機講論，No. 782-2 (昭53年)，84.
- 4) 谷口他3名；機講論，No. 790-10 (昭54年)，297.
- 5) Keith, J. E.; Wind Effect on Buildings and Structures, Proc. of the 4-th International Conf. (1975), Cambridge Uni. Press.

- 6) Tritton, D. J.; Physical Fluid Dynamics, (1977), Van Nostrand Reinhold.
- 7) Farrell, C. et al; IIHR Report, No. 165 (1974).
- 8) Farrell, C. et al.; J. of Fluids Engng., Trans. ASME, Vol. 99 No. 3 (1966), 470.
- 9) 谷口他 2 名; 機論, 46-405 (昭 55-5), 802.
- 10) 谷口他 2 名; 機論, 掲載予定.

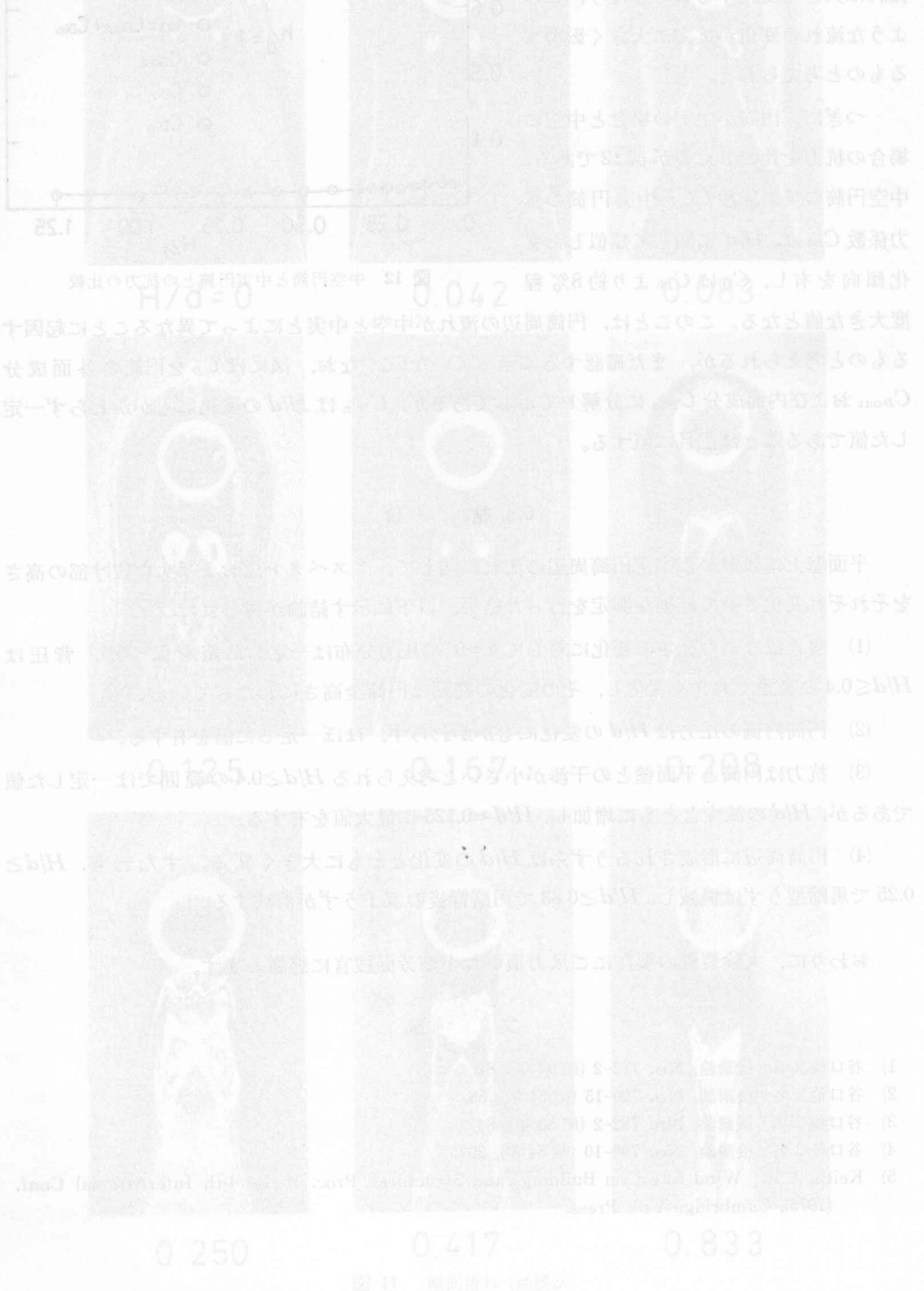


図 11 図 12