

# 固液二相流中の円柱に加わる抗力

岩永正裕・山岸陽一

Drag coefficient of Circular Cylinder in Solid-Liquid Two-Phase Flow

Masahiro IWANAGA and Yōichi YAMAGISHI

## Abstract

The flow patterns of solid liquid two-phase flow around bluff bodies have not been studied sufficiently.

So we experimentally studied the solid liquid two-phase flow around a circular cylinder, and obtained the drag coefficient to clarify the difference between single-phase flow and two-phase flow. The experimental conditions were as follows. Reynolds number was 2,500~5,500, and the volume concentration of solid particles was under 4.5%. As the particle-phase we used spherical particles of polystyrene, the diameter of which was about 0.5 mm and as the fluid-phase we used sugared water, the density of which was controled to be equal to that of particles.

As a result we obtained the following relation between volume concentration of solid particles  $\alpha\%$  and the ratio of drag coefficient of two-phase flow and that of single-phase flow  $C_D/C_{D_0}$ , which was not affected by Reynolds number under these conditions.

$$C_D/C_{D_0} = 1 + 6.04 \frac{\alpha}{100}$$

## 1. ま え が き

固液二相流中の円柱等のブラフボディまわりの流れの解明はまだ十分でない。そこで本研究では回流水槽に固液二相流を流し、レイノルズ数 2,500~5,500, 粒子体積濃度 4.5% 以下で円柱に加わる抗力を計測し、単相流と二相流における抗力の差異を明らかにする。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 回流水槽及び供試円柱

実験で使用する回流水槽（西日本流体技研製）を Fig. 1 に示す。絞り比 2, 全水量約 0.3 m<sup>3</sup>, 最大流速約 1 m/s であり, 試験流路部は幅 300 mm, 水深 200 mm, 長さ 1,000 mm の開水路である。

## 記 号

$C_D$ : 二相流の抗力係数

$C_{D_0}$ : 単相流の抗力係数

$V_{float}$ : 棒浮子による速度計測値（速度係数を掛けた値）

$V_{laser}$ : レーザドップラ流速計による速度計測値

$V_{pitot}$ : ピトー管による速度計測値（速度係数を掛けた値）

$\alpha$ : 粒子体積濃度

$\mu$ : 砂糖水の粘度

$\bar{\mu}$ : 二相流の見掛けの粘度

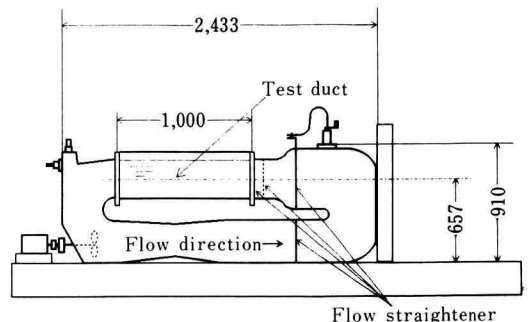


Fig. 1. Water tunnel.

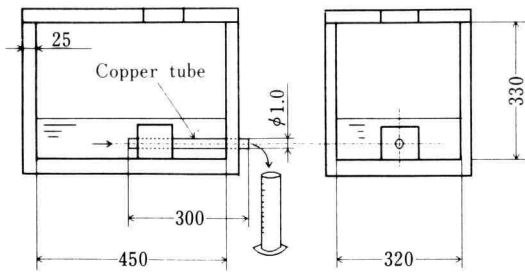


Fig. 2. Apparatus to measure the viscosity of sugared water.

供試円柱はABS樹脂製で、直径10 mm、長さ280 mm（アスペクト比28）のものを用い、試験流路部中央に設置する。

## 2.2 供試流体

単相流の実験では供試流体として水道水に砂糖を溶解した比重1.03の砂糖水を使用する。二相流の実験では比重1.03の砂糖水に直径約0.5 mmの球形ポリスチレン粒子（比重1.03）を均一に混入したものを使用し、粒子体積濃度を4.5%以下の範囲で変化させて実験を行う。

比重1.03の砂糖水の粘度はFig. 2に示す実験装置を用いて細管法により10～30℃の範囲で計測する。実験装置のタンクは断熱性の良い発泡スチロール製とし、タンク底部に銅製の細管を設置した。細管の内径は1.0 mm、長さは300 mmで、細管に加わるヘッドをゲッチングマンノメータを用いて計測した。

二相流の見掛けの粘度 $\bar{\mu}$ は砂糖水の粘度を $\mu$ 、粒子体積濃度を $\alpha\%$ として<sup>1)</sup>

$$\bar{\mu} = \mu \left( 1 - 2.5 \frac{\alpha}{100} \right)$$

により見積る。

試験流路部における二相流の体積濃度は、二相流をサンプリングしてその体積と、粒子を取り除いた液体の体積から求める。

## 2.3 流速測定

流速の測定は単相流の場合は前方散乱型のレーザドップラ流速計（日本カノマックス製）を使用する。二相流の場合は粒子によりレーザ光が遮断され、レーザドップラ流速計は使用できないため、ピトー管により

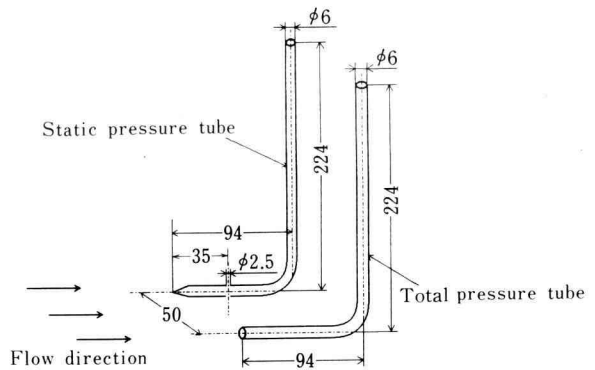


Fig. 3. Shape of Pitot tube.

計測する。

ピトー管形状はFig. 3に示すように全圧管と静圧管の二本からなり、差圧をゲッチングマンノメータで計測する。ピトー管係数は回流水槽中に砂糖水を流してレーザドップラ流速計により検定して求める。さらに二相流中においてピトー管による速度計測に問題が無いことを棒浮子を用いて確かめる。

棒浮子として直径4 mm、長さ180 mm、重さ2.2 gのプラスチック製の円筒を用いる。棒浮子の助走距離として約35 cmをとり、計測領域手前で棒浮子を回流水槽に流し、ビデオカメラで撮影する。この画像を画像処理ボードを介してパーソナルコンピュータに取り込み、棒浮子の位置を計測して、棒浮子の移動距離と時間を求め速度を算出する。棒浮子の速度係数は回流水槽中に砂糖水を流してレーザドップラ流速計により検定して求める。

棒浮子による速度計測方法は粒子の存在により影響を受けにくいと考えられるので、二相流中でピトー管による速度計測値と棒浮子による速度計測値を比較し、両者が一致するかどうかを調べることにより、二相流中においてピトー管による速度計測が可能であることを確かめる。

## 2.4 抗力測定

供試円柱の抗力を測定するためにFig. 4に示すトルク計測装置を製作し使用した。直径12.5 mm ABS樹脂製の円柱に歪ゲージを貼り付けてトルクを計測する。この円柱の両端に支柱を固定し、この支柱の先端に供試円柱を取り付ける。トルク計測用円柱と供試円柱の中心間距離は300 mmである。

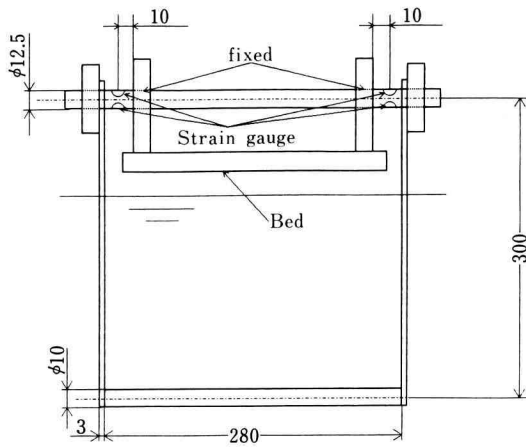


Fig. 4. Apparatus to measure the drag.

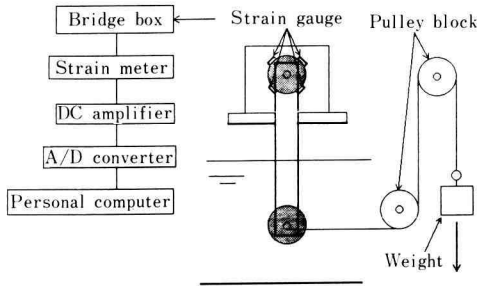


Fig. 5. Method of calibration test of torque.

歪ゲージをトルク計測用円柱表面に左右それぞれ4枚貼り付けて、4ゲージ法によりトルク計測用円柱のねじれを計測する。このねじれから供試円柱の抗力によって生じるトルクを求めるために、Fig. 5のように供試円柱部に既知の加重を加えてそのときの歪を計測し、換算率を毎回求めた。

供試円柱に加わる抗力を求めるには次のような手順で行った。

- (1) 供試円柱と支柱に加わる抗力によって生じるトルクを求める。
- (2) 供試円柱を取り除き支柱に加わる抗力によって生じるトルクを求める。
- (3) 供試円柱に加わる抗力により生じるトルクを(1)のトルクから(2)のトルクを差し引いて求める。この値をトルク計測用円柱と供試円柱の中心間距離で割って供試円柱に加わる抗力を求める。

### 3. 実験結果

#### 3.1 砂糖水の粘度

10~30℃における比重1.03の砂糖水と水道水の粘度の変化をFig. 6に示す。砂糖を溶解することにより約1.3倍粘度が増加することがわかった。

#### 3.2 流速測定の検定結果

単相流におけるピトー管の検定結果をFig. 7に示す。縦軸にピトー管の圧力差より算出した速度を、横軸にレーザドップラ流速計により計測した速度  $V_{laser}$  を取った。これよりピトー管の速度係数は0.975となることがわかった。

単相流における棒浮子による速度計測の検定結果を

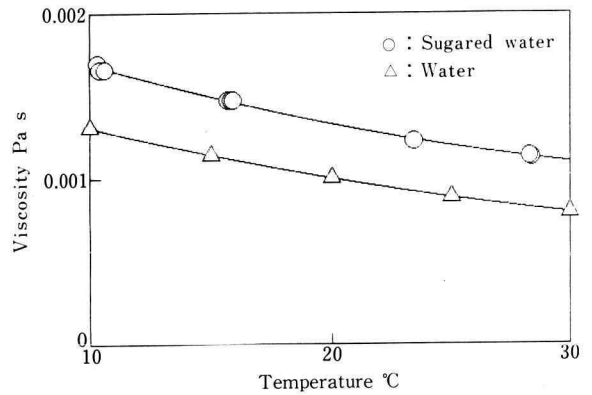


Fig. 6. Viscosity of sugared water.

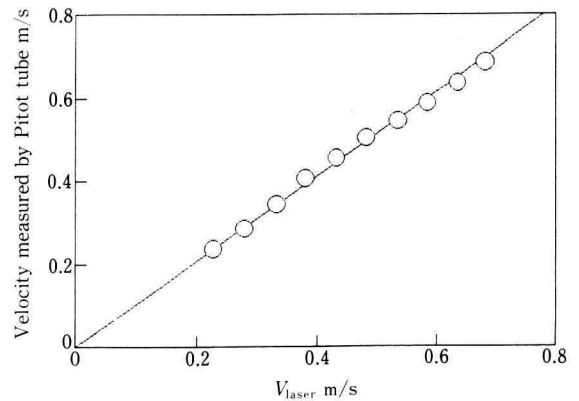


Fig. 7. Results of calibration test of Pitot tube in single-phase flow.

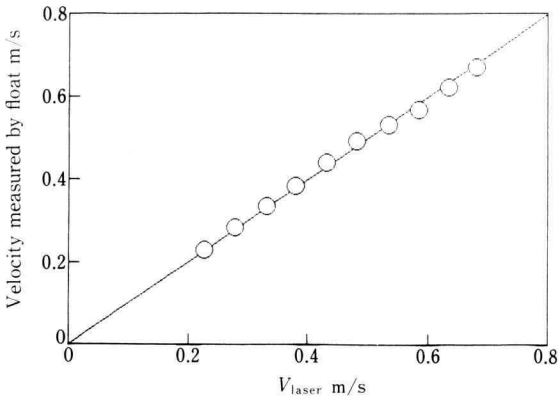


Fig. 8. Results of calibration test of velocity measurement with float in single-phase flow.

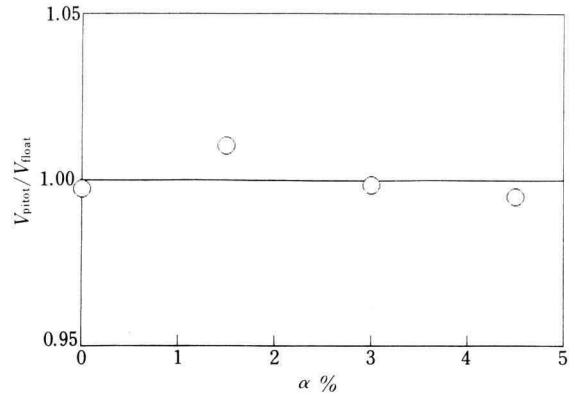


Fig. 10. Relation between volume concentration of solid particles and the ratio of velocity measured by Pitot-tube and the velocity measured by float.

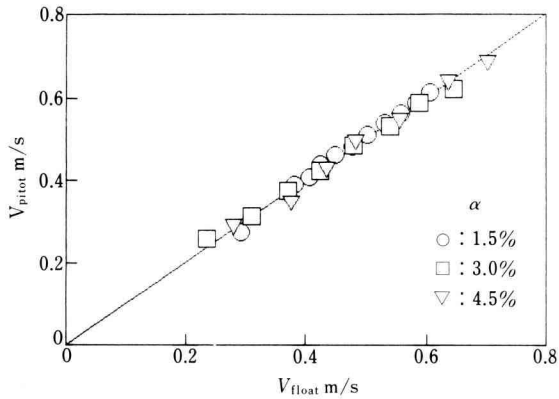


Fig. 9. Comparison between the velocity measured by Pitot tube and the velocity measured by float in two-phase flow.

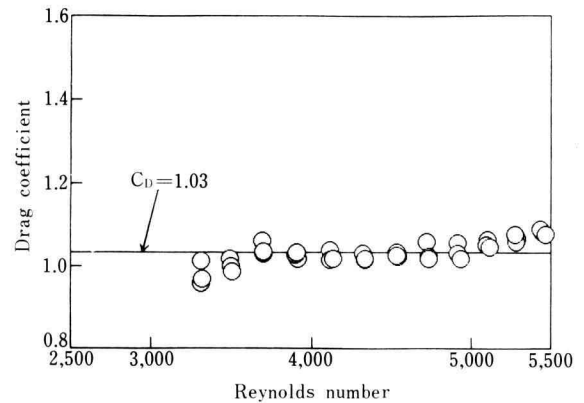


Fig. 11. Relation between drag coefficient and Reynolds number in single-phase flow.

Fig. 8 に示す。棒浮子による計測速度を縦軸にレーザー Doppler 流速計による計測値を横軸に取った。これより棒浮子の速度係数は 1.00 となった。

二相流におけるピトー管の速度計測結果を Fig. 9 に示す。縦軸にピトー管による速度の計測値  $V_{pitot}$  を、横軸に棒浮子による速度の計測値  $V_{float}$  を取った。両者はよく一致していることがわかる。

Fig. 10 は Fig. 9 から求めたピトー管の速度計測値と棒浮子から求めた速度計測値の比  $V_{pitot}/V_{float}$  を縦軸に取り、粒子体積濃度  $\alpha$  を横軸に取ったもので、粒子体積濃度によらずピトー管の速度計測値と棒浮子の速度計測値はよく一致している。これよりピトー管は液相と同じ比重の固体粒子を含む固液二相流の速度

計測に十分適用できると思われる。

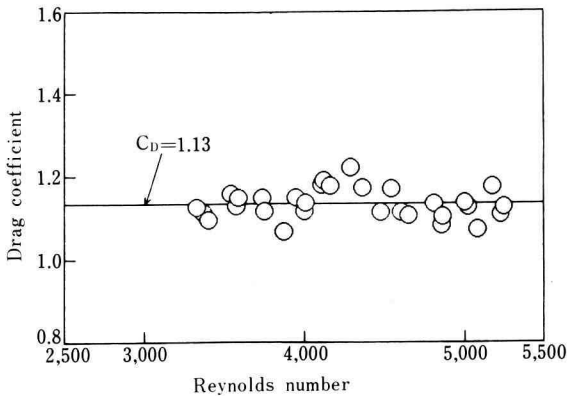
### 3.3 抗力係数

#### 3.3.1 単相流における抗力係数

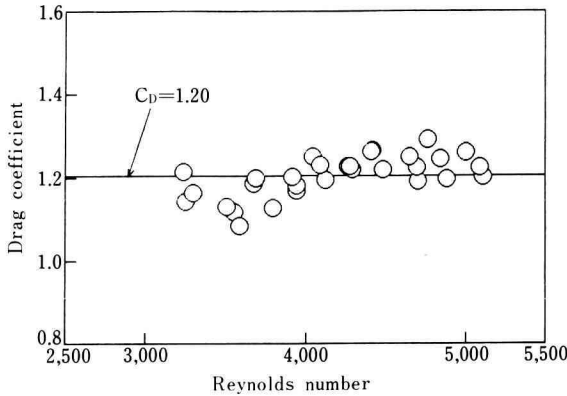
単相流（比重 1.03 の砂糖水）中の供試円柱の抗力係数とレイノルズ数の関係を Fig. 11 に示す。実線は実験点の平均値である。Wieselsberger の実験値は本研究のレイノルズ数範囲 2,500～5,500 において  $C_D = 0.95 \sim 1.05$  ではほぼ一定であり、これと本研究結果はよく一致している。

#### 3.3.2 二相流における抗力係数

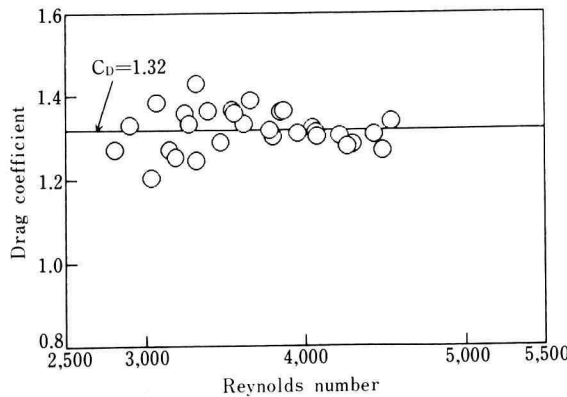
粒子体積濃度 1.5%、3%、4.5% の二相流中の供試円



(a)  $\alpha=1.5\%$



(b)  $\alpha=3.0\%$



(c)  $\alpha=4.5\%$

Fig. 12. Relation between drag coefficient and Reynolds number in two-phase flow.

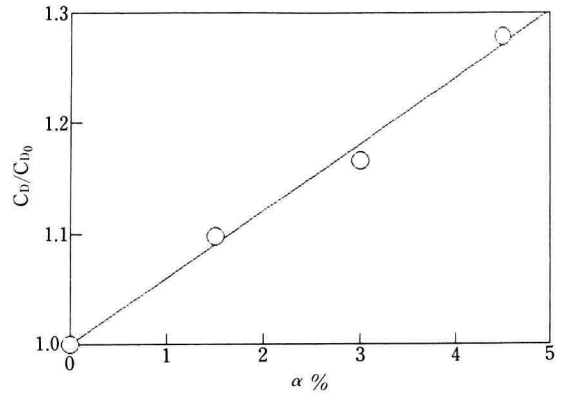


Fig. 13. Relation between the drag coefficient and the volume concentration of solid particles.

柱の抗力係数とレイノルズ数の関係を Fig. 12(a) ~ (c) に示す。実線は実験点の平均値である。抗力係数はレイノルズ数によってあまり変化せず、粒子体積濃度が増加するに従い抗力係数が増加することがわかる。

Fig. 13 は二相流中の抗力係数  $C_D$  と単相流中の抗力係数  $C_{D_0}$  の比を縦軸に、粒子体積濃度  $\alpha\%$  を横軸に取ったもので、 $C_D/C_{D_0}$  と  $\alpha$  の関係は次式のようになった。

$$C_D/C_{D_0} = 1 + 6.04 \frac{\alpha}{100}$$

#### 4. むすび

レイノルズ数 2,500 ~ 5,500, 粒子体積濃度 0 ~ 4.5% の二相流中で円柱に加わる抗力を計測し、下記の結果を得た。

- (1) 抗力係数はレイノルズ数と関係なくほとんど変化しない。
- (2) 抗力係数は粒子体積濃度  $\alpha\%$  により

$$C_D/C_{D_0} = 1 + 6.04 \frac{\alpha}{100}$$

のように増加する。

#### 5. 謝 辞

本研究は本学 4 年次卒業研究として行われたもので

あり、下記の諸君の実験結果をまとめたものである。ここに謝意を表します。

竹内 誠, 丸茂 純一,  
阿部 憲治, 鈴木 信男

さらに本研究は下記の諸君の卒業研究を基礎に発展したものであり、ここにあわせて謝意を表します。

渋谷 忠之, 鈴木 茂,  
中山 光雄, 松波 勝

黒崎 一哲, 根本 慎二,  
増田 禎, 松井 勉

## 文 献

- 1) 岩永正裕・石原智男, 日本機械学会論文集 45 卷 399 号 (1979-11), 1622