

# 流体中で旋回運動する円柱に働く流体力 (第一報 静止流体中で定常旋回する場合)

石綿良三・川口隆史

Fluid Forces on a Swinging Cylinder in a Fluid  
(1st. Report, Case of Steady Rotation)

Ryozo ISHIWATA and Takashi KAWAGUCHI

## Abstract

We are interested in the force which acts on a swinging cylinder in a fluid, because it is important that we guess the fluid force caused by the motion of a marine robot's manipulator. In this study we measured the torques  $T$  of the fluid forces under the following conditions:

- (1) The test cylinders in water rotated horizontally around the vertical axis through one sides of them;
- (2) The diameters of test cylinders  $d$  ranged from 20 mm to 30 mm, and the lengths  $l$  ranged between 150 mm and 220 mm, so the aspect ratios ranged from 5.0 to 11.0;
- (3) The angular velocities  $\Omega$  were constant, that is, the motions of test cylinders were steady rotations;
- (4) The Reynolds numbers of peripheral velocities of test cylinders  $Re$  ranged from  $3.0 \times 10^3$  to  $3.0 \times 10^4$ .

We defined the mean drag coefficient  $C_D$  by

$$C_D = \frac{T}{\rho l^4 \Omega^2 d / 8},$$

where  $\rho$  was the density of fluid, to compare it with drag coefficient of cylinder placed in uniform flow.

We obtained the conclusions that the mean drag coefficient  $C_D$  was nearly equal to drag coefficient of cylinder placed in uniform flow, and that  $C_D$  didn't depend on the aspect ratio under the test conditions.

## 1. 緒言

近い将来, 水中ロボット等の水中作業機械が軽量化, 高速化されていくことが予測される。これに伴って, 作業時に可動部に作用する流体力が本体重量に比べ相対的に大きくなり, 本体が移動する可能性が生じ, 位置決め制御等に対する流体力の影響がさらに大きくなってくるものと考えられる。このため作用する流体力を精度良く予測し, 適切な補正を行う必要がある。本研究では, この問題の基礎研究として, 水中ロボットのマニピレータを模擬した有限長円柱を静水中でその

一端を回転中心として定常旋回運動させ, 流体力によって作用するトルクを実験的に明らかにした。

また, 円柱が静止流体中で旋回運動する際の流れは流体力学的に見ても基本的な流れの一つであるが, あまり研究例が見られていない。本研究では, 従来から明らかとされている一様流に直角に置かれた円柱に作用する抗力との比較に重点を置いて, 旋回時のトルクを検討した<sup>1)</sup>。

## 2. 実験装置・方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。供試円柱はステップング・モータによって, 角速度  $\Omega = 0.5 \sim 11.7$  (rad/

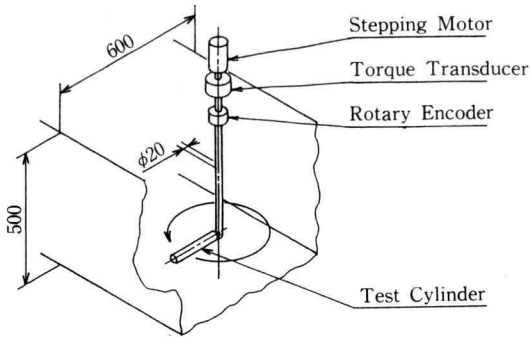


Fig. 1. Schematic view of experimental apparatus. (unit : mm)

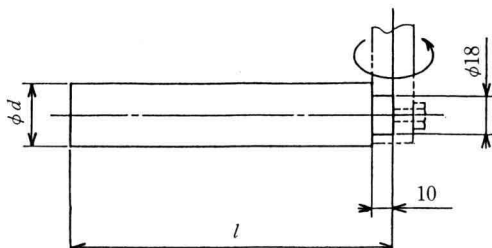


Fig. 2. Test cylinder. (unit : mm)

s)の範囲で定常回転させられる。トルクおよび回転角はそれぞれトルク変換器, ロータリ・エンコーダによって検出され, A/D変換後, マイコン内に取込まれる。水槽は幅 600 mm, 長さ 3000 mm の水路であり, 深さ 300 mm まで水を入れ, 供試円柱を底から 150 mm の高さに設置させた。

供試円柱は ABS 樹脂製で形状, 寸法は Fig. 2, Table 1 に示す通り, 直径  $d=20\sim 30$  mm, 回転中心からの長さ  $l=150\sim 220$  mm, アスペクト比  $l/d=5.0\sim 11.0$  である。外端における周速に基づくレイノルズ数  $Re(=dl\Omega/\nu)$  は 3000~30000 である。

実験では流体力によるトルクのみを求めるため, 水中で定常回転させたときのトルクから空気中で同一回転数で回転させたときのトルクの差を求め, 機械損失等によるトルクを差し引いた。

### 3. 実験結果

測定トルクの一例を Fig. 3 に示す。  $d=20$  mm,  $l=200$  mm の円柱を水中および空気中で回転させたとき

Table 1. Size of test cylinders.

$d$ (mm)	$l$ (mm)	$l/d$
20	220	11.00
20	200	10.00
20	185	9.25
20	172	8.75
20	150	7.50
25	185	7.40
30	220	7.33
30	200	6.67
30	150	5.00

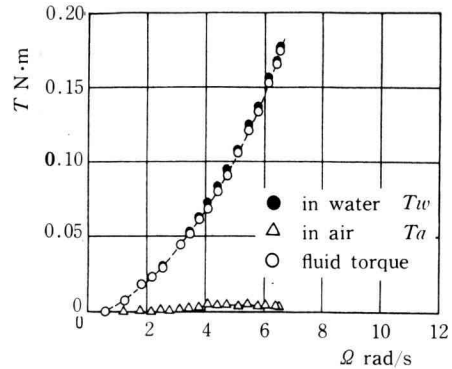


Fig. 3. Measured torque. ( $d=20$  mm,  $l=200$  mm,  $l/d=10.0$ )

のトルク,  $T_w, T_a$  および両者の差として算出される流体力によるトルク  $T(=T_w-T_a)$  を角速度  $\Omega$  に対して示している。空気中でのトルク  $T_a$  は水中でのトルク  $T_w$  に比べ, 5% 程度以下となっている。なお, 水と空気の密度比がおおよそ 800 以上であるので空気抵抗によるトルクの影響は無視した。

同様に各供試円柱で測定された流体力によるトルク  $T$  の例を 4 本の円柱について Fig. 4 に示す。トルクは角速度に対してほぼ放物線状に変化している。

ここで流体力を評価するため, 流れに直角に置かれた円柱の抗力係数  $C_D$  との比較を行う。このとき円柱に作用する単位長さ当りの抗力  $D$  は,

$$D = C_D \cdot \rho u^2 d / 2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで,  $\rho$  は流体の密度,  $u$  は流速である。

Fig. 5 に示す旋回時にも各半径位置において式 (1)

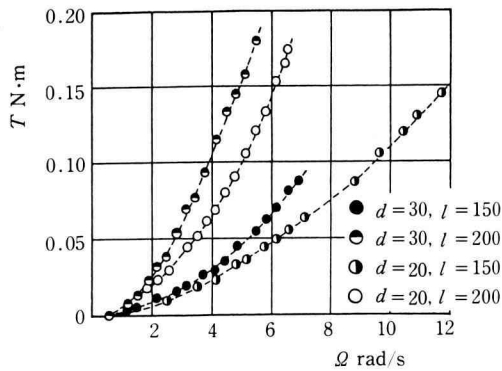


Fig. 4. Torques by fluid forces.

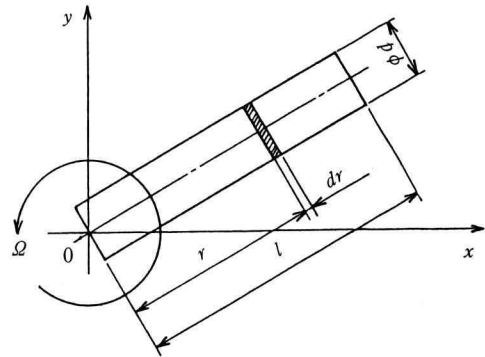


Fig. 5. Coordinates on a swinging cylinder.

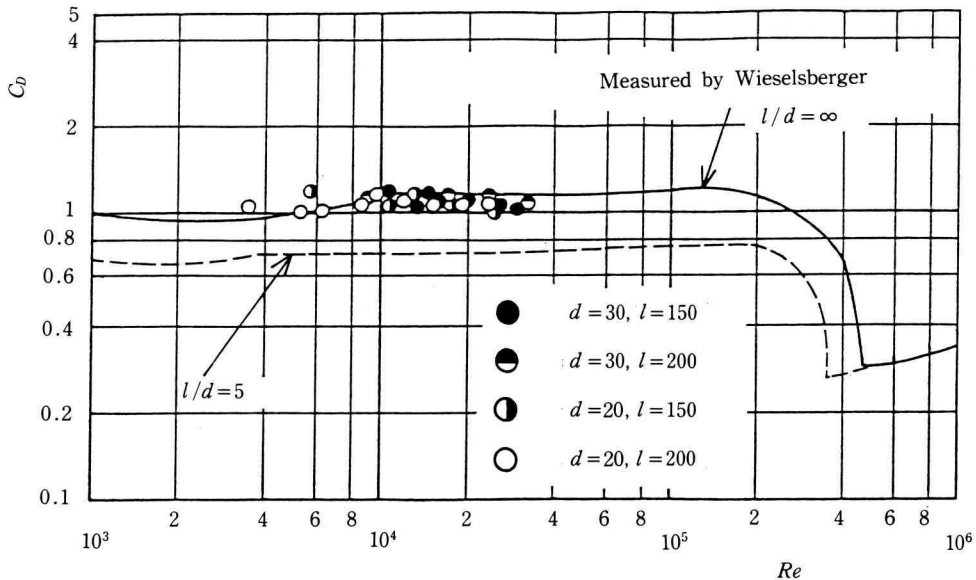


Fig. 6. Comparison between mean drag coefficients and drag coefficients of cylinder placed in uniform flow.

を適用すると、長さ  $dr$  部分に作用する抗力  $dD$  は、

$$dD = C_D(\rho r^2 \Omega^2 d / 2) \cdot dr \quad \dots\dots\dots(2)$$

一般に  $C_D$  は半径  $r$  によって変化するが、ここでは半径方向に一定値とみなし、式(2)に  $r$  を乗じ、半径方向に積分すると、流体力によるトルク  $T$  が求まる。

$$T = C_D \cdot \rho l^4 \Omega^2 d / 8 \quad \dots\dots\dots(3)$$

これより、抗力係数  $C_D$  を求めると、

$$C_D = T / (\rho l^4 \Omega^2 d / 8) \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(4)は抗力係数の平均値と考えられ、これを流れに直角な円柱のときと比較する。

Fig. 6は式(4)から計算される  $C_D$  を外端における周速に基づくレイノルズ数  $Re$  に対して表示したものである。記号は本実験点、実線は流れに直角な十分長い ( $l/d > 100$ ) 円柱の抗力係数<sup>2)</sup>、破線は同じくアスペクト比  $l/d = 5.0$  の場合である<sup>3)</sup>。円柱が旋回する場合

には旋回半径方向の流れが誘起され、流れが三次元的になるが、得られる抗力は流れに直角な十分長い円柱の場合<sup>4)</sup>と同程度であることがわかる。また、流れに直角な円柱の場合はアスペクト比が小さくなるほど抗力係数が小さくなることが知られているが<sup>3)</sup>、本実験結果ではアスペクト比による影響はあまり顕著ではない。旋回円柱では遠心流れによって円柱端における流れのまわり込みが抑制され、アスペクト比による影響が緩和されたものと推察される。

#### 4. 結 言

静止流体中で旋回運動する有限長円柱の流体力によるトルクを実験的に求めた結果、一様流中の円柱の抗力係数から予測されるトルクと同程度であることが明らかとなった。また、旋回円柱ではアスペクト比による影響があまり顕著に現れないことが確認された。

なお、本研究は加速、減速旋回する場合の流体力に関する研究の予備研究として行われ、これらに対して文部省科学研究費（奨励研究 A）の援助を受けたのでここに謝意を表す。

また、実験にご協力いただいた本学学生の徳田真也、福島稔、増田敬久、武藤英史の諸氏に感謝の意を表す。

#### 文 献

- 1) 石綿, 川口, 機械学会講演概要集, No. 880-4 (1988), p.7.
- 2) Schlichting, H., Boundary-Layer Theory (1955), p.17.
- 3) 機械学会編, 機械工学便覧, 流体工学, 新版(1986), p.103.
- 4) Delany, K., et al., NACA TN, 3038 (1953).