

大阪市立大学工学部

正会員

永井 荘七郎

○ 倉田 克彦

大阪市立大学大学院

学生員

角野 昇八

流れの中に、2つ以上の物体が、相互の間隔をあまりあけなく存在する場合には、それぞれの周りの流れの状態および物体に働く力は、相互干渉によって、物体が単独に置かれている場合とは異なってくる。本研究は、円柱の相互干渉についての基礎的な知識を得るため、図-1に示すように、流れの方向に平行に2本の円柱を置いた場合、それぞれの円柱に働く力について、相互干渉による影響を明らかにしようとしたものである。図-1において、 F_u : 上流側円柱に働く力、 F_d : 下流側円柱に働く力、 U : 上流側円柱前面の平均流速、 D : 円柱直径、 L : 上流側円柱と下流側円柱との中心間隔、あるいは単独に置かれた円柱の中心より後流中心の流速測定点までの距離、 F_0 : 単独に置かれた円柱に働く力、 u_0 : 単独に置かれた円柱背後の後流中心の平均流速である。

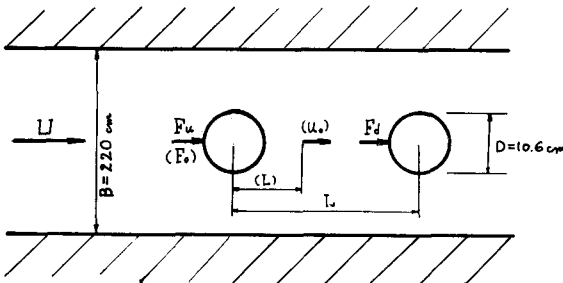
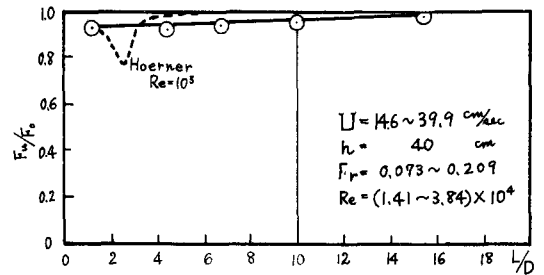


図-1 流れの方向に平行に置かれた2本の円柱

図-2 上流側円柱に働く力 F_u

$$F_u/F_0 = 0.907 + 0.00530 \cdot L/D \quad (1)$$

1. 上流側円柱に働く力 F_u におよぼす下流側円柱の影響

上流側円柱に働く力 F_u が、下流側円柱との間隔により、どのように変化するかを示したものが図-2である。図-2において、破線で示した値はHoernerによるものであり、我々の実験結果とは多少違った傾向を示している。この原因としては、流体が水であるか空気であるかの違い、すなわち水と空気との粘性の違い、上流側円柱の後流あるいは上流側円柱より発生する渦の性質、それぞれの減衰拡散の状態の違いまた自由表面を持った流れと持たない流れとの違い、造波抵抗の影響等が考えられるが、その詳細については明らかにしていない。

我々の実験結果によれば、 $1.1 \leq L/D \leq 15$ の範囲では、 F_u/F_0 は(1)式で表されるような直線的な増加をし、 $L/D = 15$ になるとほぼ $F_u/F_0 = 1.0$ になり、上流側円柱におよぼす下流側円柱の影響はなくなるようである。以上のことは次のようにして説明できるであろう。

$L/D = 1.1$ の場合には、図-3に示すように、流れは2本の円柱を取囲むような流れとなり、2本の円柱の間の流体は、ほとんど静止したような状態にあり、上流側円柱については、渦の発生による影響が小さくなり、上流側円柱背面の圧力は、下流側円柱が存在しない場合より大きくなるのではない

かと考えられる。したがって円柱全体に働く力としては、単独の円柱の場合より小さくなるのである。 $2.2 \leq \frac{L}{D} < 15$ の範囲では、上流側円柱の後流の発達、振動が下流側円柱の存在により抑制され、その結果後流の状態が比較的安定になり、後流中で失われる流れの運動量が減少するため、円柱背面の流れの圧力が単独の円柱の場合より大きくなり、円柱に働く力としては小さくなるものと思われる。このように円柱に働く力に密接な関係を持つと思われる後流の状態を図-3～6に示す。有江等も、後流の振動状態と円柱に働く力についての検討も、後流を視覚化することにより行ない、上述のようなことを結論づけている。

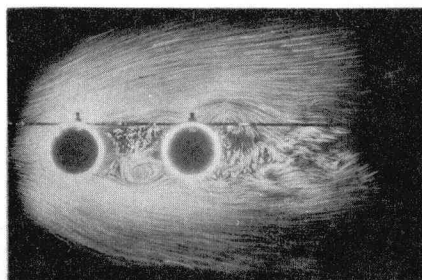
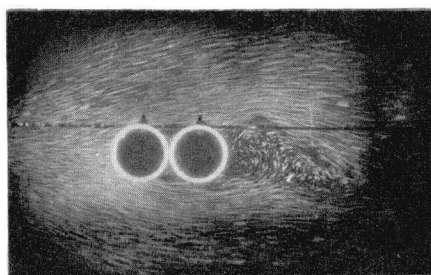


図-3 $\frac{L}{D}=1.1$ ($U=21.4 \text{ cm/sec}$ $Fr=0.108$ $Re=2.06 \times 10^4$) 図-4 $\frac{L}{D}=2.2$

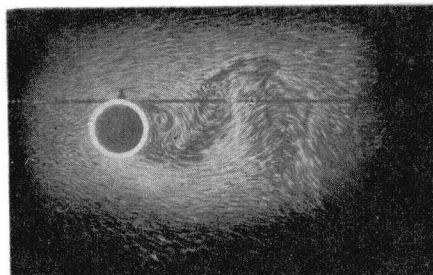
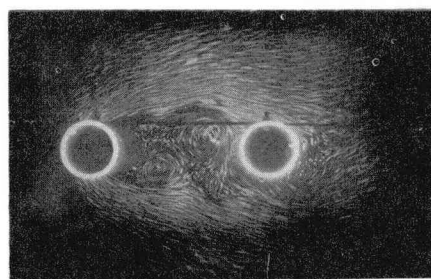


図-5 $\frac{L}{D}=3.3$ ($U=21.4 \text{ cm/sec}$ $Fr=0.108$ $Re=2.06 \times 10^4$) 図-6 $\frac{L}{D}=\infty$ (単独円柱)

2. 下流側円柱に働く力 F_d におよぼす上流側円柱の影響

下流側円柱に働く力 F_d を測定した結果は、図-7に示すとうりである。この場合にも、破線で示した Hoerner による値とは異なっている。この原因については、1. で述べたことと同様のことが考えられる。図-7からも明らかなように、下流側円柱に働く力は、上流側円柱の存在によって顕著な影響を受け、 $\frac{L}{D}=1.1$ では $F_d/F_0 = -0.15$ 、 $\frac{L}{D}=6$ では $F_d/F_0 = 0.65$ と、 F_d はかなり小さくなり、その変化は(2)式で示されるようである。

$$\left. \begin{aligned} F_d/F_0 &= 1.16 - 1.34 \left(\frac{L}{D} \right)^{\frac{1}{2}} & 1.1 \leq \frac{L}{D} < 10 \\ &= 0.68 + 0.0056 \frac{L}{D} & 10 \leq \frac{L}{D} \leq 16 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

このように F_d が小さくなる原因としては、次のようなことが考えられるであろう。

$\frac{L}{D}=1.1$ では、流れは2本の円柱を包むように流れ、円柱間の流体は静止状態に近く、下流側円柱前面

の圧力は、単独の円柱の場合より小さく、静圧に近くなると思われる。一方下流側円柱背後では逆流が生じており、背面では、静圧の他に逆流により負の方向の力(円柱前面の流れと反対方向の力)が働くことになり、合力としては、平均的に負の方向の力が働くものと考えられる。 $2.2 \leq L/D < 6$ の範囲では、上流側円柱より発生した負の運動量を持つ渦が、下流側円柱の前面に衝突し、その運動が阻止

される結果、衝突箇所では負の力が働き、円柱全体の力としては、一本の円柱の場合より小さくなる。また上流側円柱の後流中では、流れの持つ運動量が、前面の流れに比して小さくなっており、下流側円柱の存在により流れが失う運動量の大きさを示す円柱に働く力は小さくなる。以上の2つがその原因として考えられる。 $6 \leq L/D \leq 16$ においては、渦が直接円柱に衝突することはない、上流側円柱の存在により、流れの持つ運動量(流速)が小さくなる、ということが第1の原因であろう。

3. 単独円柱の後流中心の流速分布

2.で示したように、下流側円柱は上流側円柱の後流の影響が顕著に現われるため、単独に置かれた円柱の後流中心の流れ方向の流速分布を調べ、流れの持つ運動量(流速)の減少状態を明らかにしようとした。その結果を図-8に示す。図から明らかなように、 $L/D=1.0$ では、 $u_0/U = -0.25$ と逆流を生じており、 $L/D=5.0$ では

$u_0/U = 0.7$ 程度、 $L/D=25$ においても $u_0/U = 0.8$ 程度と速度の回復は緩やかであり、かなり下流まで速度の減少が認められた。図中の破線は、(3)式で表わされるような、後流中の静圧 p が一定であるという条件のもとに、運動方程式を解いて得られたものである。

$$\frac{u_0}{U} = 1 - \frac{\sqrt{10}}{18k} \left(\frac{C_D \cdot D}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

k : ある係数 $= 0.18 \sim 0.21$

C_D : 円柱の抵抗係数 $= 1.2$ とした

このように2次元的な円柱の後流中心の流速を表わす(3)式は、フルード数 $Fr = \frac{U}{\sqrt{g h}}$ が小さく、水面の乱れの影響が小さければ、 $L/D > 4$ においては、実験結果と比較的によく一致するようであるが、 $4 \geq L/D > 1$ ではあまり一致しないようである。これは $4 \geq L/D \geq 1$ では渦の影響により $p = \text{const.}$ という条

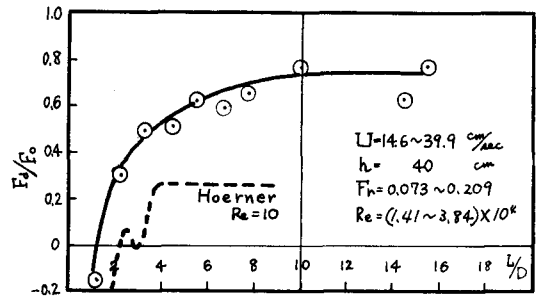


図-7 下流側円柱に働く力 F_x

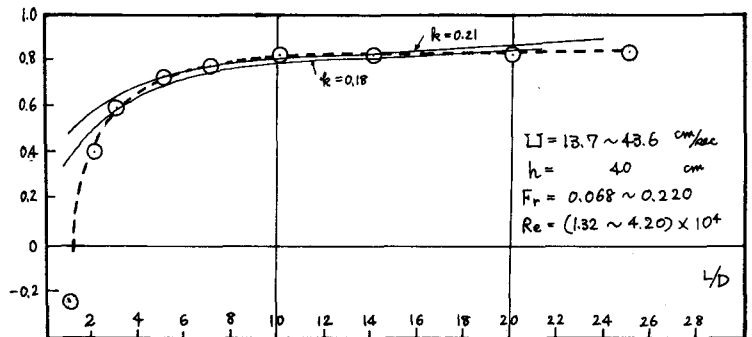


図-8 後流中心の流速 u_0

件が充分満たされていないためと思われるが、これについての詳細な検討は後の機会に譲りたい。

4. F_d/F_o と U_o^2/U^2 の関係

下流側円柱に働く力 F_d および単独に置かれた円柱に働く力 F_o を、それぞれ次のように表わす。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_{Rd} A_d U^2 \quad (4)$$

$$F_o = \frac{1}{2} \rho C_{Ro} A_o U^2 \quad (5)$$

ここに

ρ : 水の密度, C_{Rd} : 下流側円柱の抵抗係数, C_{Ro} : 単独の円柱の抵抗係数

A_d, A_o : 下流側円柱あるいは単独の円柱の流れに垂直な面への投影面積

U : 下流側円柱に作用する流れの平均流速, U_o : 単独の円柱に作用する流れの平均流速

今回の実験のように、フルード数が小さい範囲では、表面の乱れ、円柱の前後面間の水位値下は水深に比して小さいため、同じ流れの中に置かれた場合は $A_d = A_o$ と置くことが出来る。また下流側円柱に作用する流れの流速として、単独に置かれた円柱の後流中心の流速 U_o を用いれば、(4)式は

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_{Rd} A_o U^2$$

となる。(5)式と(6)式から $F_d/F_o = \frac{C_{Rd}}{C_{Ro}} \frac{U_o^2}{U^2}$ となるが、実験により F_d/F_o と U_o^2/U^2 とを比較してみると、

図 9 に示すように、 L/D による両者の変化の状態はよく一致しているという興味ある結果が得られた。このことは、下流側円柱に作用する流れ

の流速として、単独円柱の後流中心の流速 U_o を用いれば、 $C_{Rd}/C_{Ro} = 1.0$ すなわち両者の抵抗係数は変わらないということを示している。

5. あとがき

以上の研究により、2本の円柱の場合については、円柱間の相互干渉について、ある程度の知識を得ることができたが、未だ充分なものではなく、今後更に詳細な研究を続けて

行きたい。また円柱が3本以上置かれた場合、基盤形に配列された場合についても、検討を加えたい。

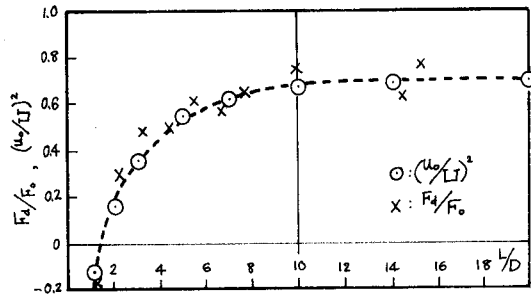


図-9 F_d/F_o と U_o^2/U^2 の比較

参考文献

円柱の相互干渉 : 倉田克孝, 修士論文, 大阪市立大学大学院工学研究科, 昭44.3.

Fluid-Dynamic Drag : S.F. Hoerner

空気の制御による円筒抗力の変化について : 有江, 坂本, 森田, 第781回読者会流体力学流体力学機械識読論文集, 昭43.8

流体力学 : 藤本武助