

京都大学工学部 正員 石合 宏之

水理構造物の振動現象を解明するための基礎的研究として、流体力の特性を知るため、水理構造物として、もっとも単純なモデルの一つである開水路に設置された円柱ととりあげ、それに作用する流体力とくに変動圧力について実験をおこなったので、得られた結果と若干の考察について述べる。

1. 実験装置および方法

全長10m、幅0.3mおよび深さ0.4mのアルミ製水路の中央部に図-1に示されるように円柱を固定した。実験には直径 $d=4.76\text{ cm}$ 、 3.80 cm および 2.85 cm の円柱を用いた。それぞれの円柱には圧力測定用の小孔(直径1mm)が円柱の中心を対称にして2カ所あいている。この孔の位置は上下可動分度器によって水深方向、回転方向の任意の位置に設置することができる。圧力の測定は差圧式圧力変換器を用いておこない、電磁オシログラフに記録した。また、流体中の圧力測定にはピトー静圧管を用いた。

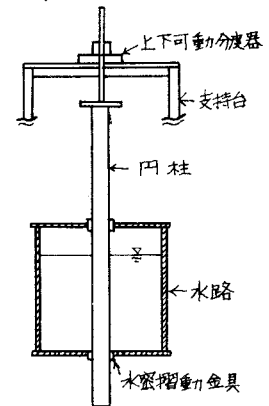


図-1 円柱及水路

2. 実験条件

実験に用いられた水理条件その他は表-1に示されるとおりである。各実験について円柱表面および流体中での圧力測定をおこなったが、圧力測定の測定の詳細は以下に示されるとおりである。

実験1：円柱表面では $z=2.5, 10, 15, 25, 28$ の各断面においてはそれぞれ $\theta=0^\circ$ および 90° の2点、 $z=20\text{ cm}$ の断面においては $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ の7点で測定した。ここに座標系は図-2に示されるとおりである。流体中では、円柱より上流における $x=-15d$ 、 $y=0$ 、 $z=20\text{ cm}$ の点と下流における $x=5d, 10d, 18d, 30d$ の断面の $y=d$ 、 $z=20\text{ cm}$ の各点で測定した。

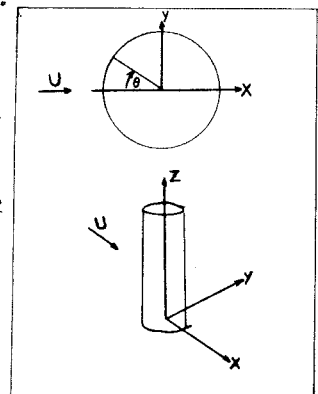


図-2 座標系

実験2,3,4,5,6：円柱表面では $z=20\text{ cm}$ の断面で $\theta=0^\circ, 90^\circ$ の2点、流体中では $x=-15d$ 、 $y=0$ 、 $z=20\text{ cm}$ の各点で測定した。

実験番号	円柱直径	平均流速	水深	レイルズ数	フルド数	水温
1	4.76 cm	25.2 cm/sec	30.06 cm	1.08×10^4	0.15	16.0 °C
2	4.76	33.8	30.00	1.55×10^4	0.20	18.7
3	3.80	18.3	30.04	0.60×10^4	0.11	14.6
4	3.80	30.1	30.05	1.01×10^4	0.18	15.4
5	2.85	24.4	30.05	0.58×10^4	0.14	13.4
6	2.85	37.7	30.08	0.90×10^4	0.20	13.4

表-1 実験条件

3. 変動圧力の大きさ

測定された圧力 p を時間的な平均値 $\bar{p}$ とそれからのずれ p' に分けるとき, p' を変動圧力と呼ぶことにする。また p' の大きさを表わす量として標準偏差 $\sqrt{p'^2}$ も用いる。以下実験によって得られた $\sqrt{p'^2}$ について述べる。

3-1. θ 方向の分布

実験1において測定された $Z=20\text{ cm}$ における $\sqrt{p'^2}$ の θ 方向の分布は図-3 に示されるとおりであるが, この図によれば, $\sqrt{p'^2}$ は θ が増すにつれて若干増加する傾向がみられるが, ほぼ一定と考えられる。

3-2. 水深方向の分布

実験1において測定された $\theta=0^\circ$ および $\theta=90^\circ$ における $\sqrt{p'^2}$ の水深方向の分布は図-4 に示されるとおりであるが, $0^\circ, 90^\circ$ とどちらの場合にも, $\sqrt{p'^2}$ は水路近傍において他の部分にくらべて大きな値を示している。このことは開水路における乱れの強さが境界面近傍において大きな値をとることが, このような構造物表面の圧力変動にも影響しているのではないかと考えられる。 $Z=20\text{ cm}$ より上方においては, 0° と 90° における $\sqrt{p'^2}$ の大きさはほとんど変わらないが, $Z=5, 10, 15\text{ cm}$ の各断面においては, 0° における値よりも 90° における値の方がかなり大きな値を示している。このような傾向をみると, 図-3 にみられるような θ 方向の分布形状は水深方向に一定のものではなく, 変化するものと考えられる。

3-3 変動圧力の大きさと Re 数

図-5 には $\theta=0^\circ$ における $\sqrt{p'^2}$ の値と Re 数との関係を示した。この図によれば, Re 数が 6000 から 15000 の範囲内ではあまり変化しないことがわかる。また, この図において, $\oplus$ は円柱より上流側 $15d$ の流体中においてヒト-総圧管によって測定された $\sqrt{p'^2}$ の値を示しているが, これらの値の変化の傾向は円柱表面上 0° の点における値とよく似ている。しかし, その大きさはすべて円柱表面上の値よりも大きい。このことは, 円柱表面においても, ヒト-総圧管においても測定は同じよとみえておこなわれたのであるが, それぞれの測定点近傍の流場の状態が大きく変化することが乱れの強さを変えることになるのではないだろうか。この点については圧力測定部の形状という点からも検討しなければならないと考えられる。

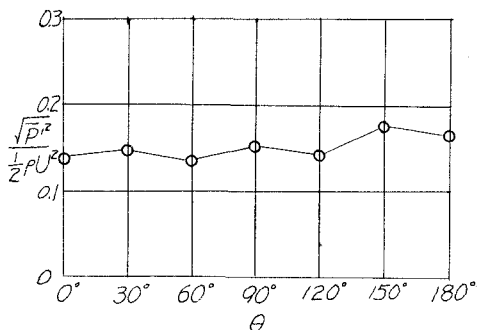


図-3 変動圧力の大きさ (θ 方向)

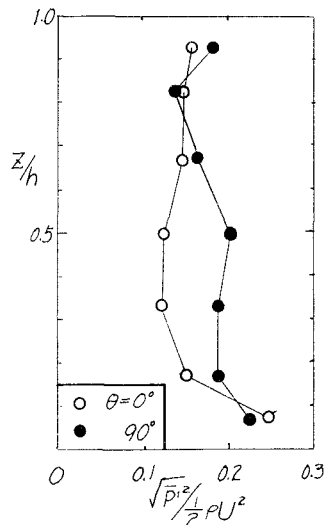


図-4 変動圧力の大きさ (Z 方向)

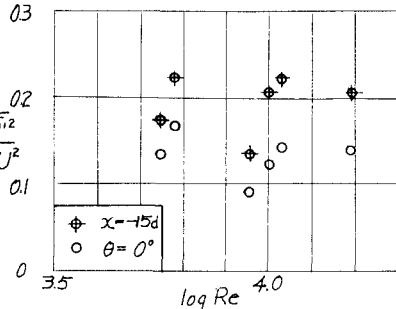


図-5 変動圧力の大きさと Re 数

4. 変動圧力の卓越周波数成分

円柱に作用する変動圧力には種々の周波数成分が含まれていると考えられているが、3に述べた方法では各成分の性質について知ることができない。そこでここでは変動圧力の周波数特性について、スペクトル解析をおこなった結果をもとにして若干の考察をのべる。なお、スペクトルの計算はTucky (1949)の方法により京都大学電子計算機KDC IIをもちいておこなった。

4-1. 卓越周波数

図-6は実験1で得られた変動圧力のスペクトルが、 θ 方向にどのように変化するかを示したものである。この図によれば、スペクトル密度は θ 方向に変化するが卓越周波数は角度によって変化しないことがわかる。このことは、ここには図を示さなかったが水深方向についてもいえるようである。したがって、ここでおこなった実験ではRe数が一定の場合円柱の各部における周期変動の周波数は一定と考えてもよいであろう。

つぎにRe数が変化した場合には、測定が同じ場所であっても卓越周波数は変化する。そこで、従来、後流における渦の発生周波数はストローハル数とRe数との関係で整理されており、また、カルマン渦のモデルでは圧力の変動の周期は渦の発生の周期と同じであるといわれているから、ここでも図-7に示されるようにストローハル数 S をもちいて整理した。ここに速度として上流側15dにおける断面平均流速、長さとして円柱の直径 d をもちいている。この図によれば、ストローハル数は、このRe数領域で従来得られている結果と同様に約0.2近傍の値を示している。

4-2. 卓越周波数成分の大きさ

スペクトル図より卓越周波数成分の大きさはつぎのようにして求めることができる。 f_p を卓越周波数、 $F(f_p)$ を卓越周波数におけるスペクトル密度とすると、卓越周波数成分の大きさ $\sqrt{p_p^2}$ は

$$\sqrt{p_p^2} = \sqrt{F(f_p) \Delta f}$$

とあらわされる。図-8は、実験1における各角度 θ に対する卓越周波数成分の大きさを示したものである。この図によると卓越周波数成分の大きさは $\theta=90^\circ$ において最大であり 90° から 0° および 180° 方向へ近づくに従って減少している。この減少の様子は左右対称ではなく円柱前面における値の

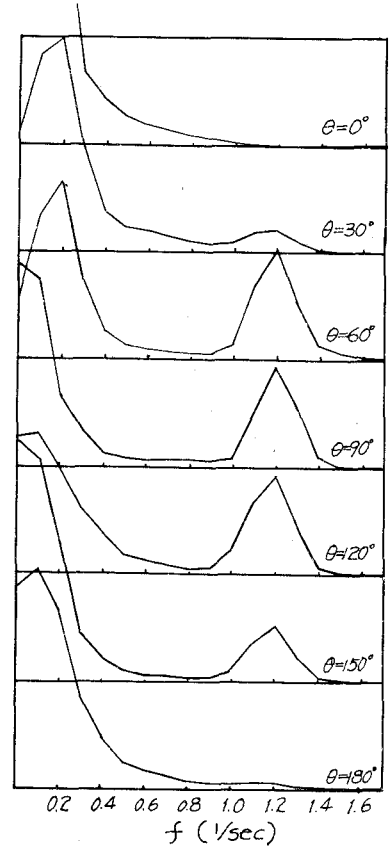


図-6 規格されたスペクトルの周方向の変化

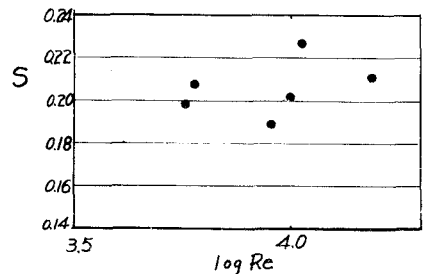


図-7 ストローハル数

方が後面における値よりも小さくなるようである。Gerrard が風洞において測定した結果では、 $\theta=120^\circ, 150^\circ$ においては、 90° における値よりも大きな値を示すということが報告されているが、この実験ではこのようなことはみられない。

つぎに図-9 は実験1の場合の卓越周波数成分の大きさと水深の関係を示したものである。この図によれば卓越周波数成分の大きさは水路底に近くなるほど大きな値を示すようである。

5. 後流の特性と変動圧力との関係

カルマン渦のモデルにおいても、後流の性質は物体の周りの抗力に大きく影響するといわれている。そこでこの研究においても、後流領域の諸特性と円柱に作用する流体力との関係を明らかにするにつかむため、ピトー静圧管をもちいて後流中での変動圧力の測定をおこなった。このようにして得られた変動圧力のスペクトルをもとめ、その流下方向への変化の模様を図-10 に示した。この図によれば変動圧力の全エネルギーは流下距離が増大するとともに減少していることがわかる。またこの図によると下流へいくにしたがって変動圧力の卓越周波数成分が減少し、徐々に不規則成分のみをあらわすスペクトルに漸近し、 $x=30d$ においては卓越した周波数成分はほとんどなくなることがわかる。

つぎに卓越周波数の変化についてしらべてみよう。 $x=5d$ の場合の卓越周波数は1.2であり、同じRe数の場合の円柱表面に作用する変動圧力の卓越周波数と一致している。しかし、下流へいくにつれ卓越周波数は減少している。すなわち、後流中円柱近傍における変動圧力の卓越周波数は円柱表面における変動圧力の卓越周波数と一致するが、円柱からはなれるにしたがって、両者の差は増大していくようである。

参考文献

- 1) Gerrard, J. H. : An experimental investigation of the oscillating lift and drag of a circular cylinder shedding turbulent vortices, Jour. of Fluid Mechanics, vol 11, 1961.

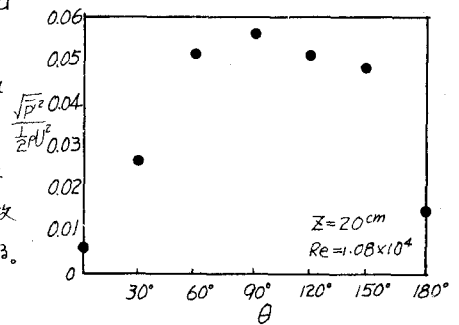


図-8 卓越周波数成分の大きさ (θ 方向)

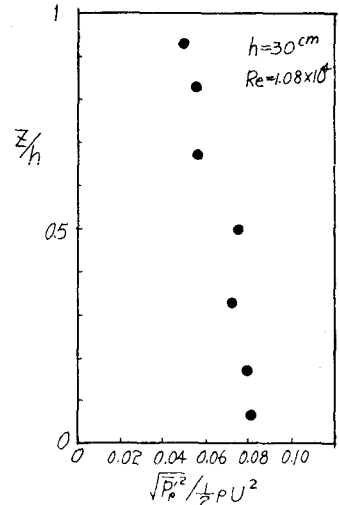


図-9 卓越周波数成分の大きさ (Z 方向)

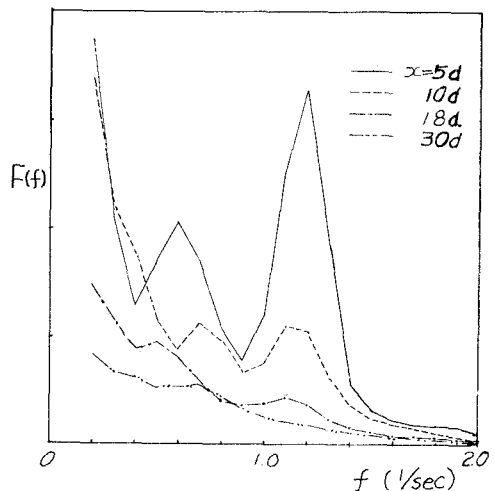


図-10 後流における圧力変動のスペクトル