

九州大学応用力学研究所 正員 岡島 厚, 中村泰治

1. まえがき. 近年, 煙突や塔状構造物の超高化の傾向が著しく, 風による振動の問題が重要視されている。実際の煙突の振動の観測結果によれば, 振動時におけるレイノルズ数(Re数)は $Re=10^6$ 以上で先端では直径の10%以上の振幅の例もある。しかし, 今日まで風洞における比較的低いRe数範囲の円柱の振動実験は数多くあるが(2),(4) 実際の煙突の振動時のRe数, すなわち超々臨界領域における円柱の振動実験はほとんど行われていない。

事実, 風洞実験で超々臨界領域のRe数を導くことは難しく, しかの振動実験においては模型の機構上, その固有振動数をあまり大きく出来ない制約から試験風速を低く押えることが望ましい。そこで本研究では既に報告(5)したごとく, まず静止円柱の場合, 表面全周に一樣あるいは局所的に表面粗さの帯を付ける方法によって境界層の層流から乱流への遷移を促進させて, 比較的低いRe数で超々臨界領域の流れの状態を実現させ, その際の円柱後流に極めて周期性の高い渦列が形成されていることなどを明らかにした。図1にはそのうち本実験で用いる粒子径 $d/D=8.5 \times 10^{-3}$ (d : 粒子径, D : 円柱直径) かつ表面粗さを円柱表面に全周一樣に貼った場合および幅2cmの表面粗さ($4d=2.5 \times 10^{-3}$)の帯をよどみ点から $\theta=50^\circ$ の位置に上下対称に貼付した場合のRe数に対する抵抗係数 C_D とストロハル数(S_t 数)の変化を示した。本報告はこれらの結果に基づいて, 表面粗さによって実現した超々臨界領域における円柱のうず動振の様相を自由振動法によって明らかにする。

2. 実験装置. 図2は風洞測定部(1)(高さ4m幅2m)に設置した模型円柱(2)を示す。模型円柱は直径 $D=60\text{cm}$, スパン長2mで測定部における模型の開き率15%である。模型は出来るだけ軽量になるよう発泡スチロール製で中心部を空洞にした。表面粗さは粒子径約 $d=1.5\text{mm}$ と 5mm の発泡スチロール粒子を篩い分けして粒子径をそろえた後, 両面粘着テープで円柱表面に接着して造った。模型は流れに対して左右対称に一對の板ばね(3)(厚さ5mm幅10cm長さ200cm)および上下のコイルばね(4)によって弾性支持され, 固有振動数は $f_n=2.44\text{Hz}$ (3.09Hz)で流れに直角な方向に並進振動するようになっている。なお, この種の実験においては模型端部の間隙の影響は無視し難いが, この場合端板(5)(発泡材製, $126\text{cm} \times 146\text{cm}$)と風洞壁の間隙を図に示す如く狭くしてその影響を軽減した。また, ダンパ(6)は狭い隙間のある箱の中に薄い板を入れ, 板と箱の隙間にグリセリン水溶液を入れた粘性平行板方式を用い, 板の大きさやグリセリンと水の混合比を種々変えて減衰率を変えた。模型円柱の後流の速度変動は模型中心から直径の2倍下流で, 直径の距離だけ下方の位置に挿入した熱線プローブによって検出した。

3. 実験結果.

3-1) 全周一樣表面粗さの場合 ($d/D=8.5 \times 10^{-3}$). 全周一樣に表面粗さのある円柱の系の固有振動数は $f_n=2.44\text{Hz}$ である。静止の場合の渦列の周波数と一致する共振風速は $V_{cr}=5.8\text{ m/sec}$ で, この場合のRe数は $Re=23 \times 10^5$ となり, 既に超々臨界領域に達している(図1)。図3には実験結果の一例として

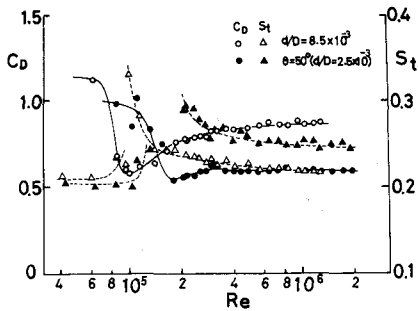


図1. 全周一樣および局所的に表面粗さのある円柱の抵抗係数 C_D とストロハル数 S_t (実測値は風洞上壁の修正が行われている)

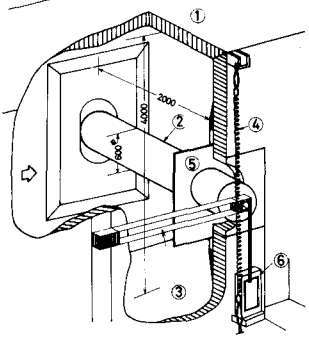


図2. 風洞測定部に設置した模型円柱.

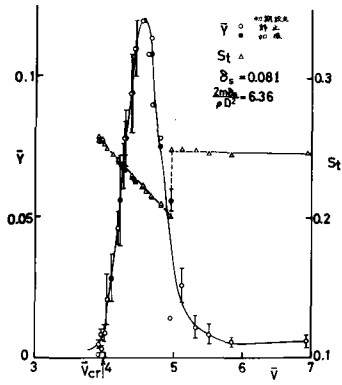


図3. 弾性支持された円柱の振動振幅 \bar{v} とストロハル数 S_t . (全周一樣表面粗さ, $d/D=8.5 \times 10^{-3}$)

(桁数)減衰率 $\delta_s = 0.081$, 減衰比率 $2m\delta_s/\rho D^2 = 6.36 (m:$
 円柱の単位長さ当りの質量, ρ : 空気密度) の場合, 無次元風速 $\bar{V} = V/f_c D$ (V : 一様風速, f_c : 模型の振動数) に対する円柱の振動変位の片振幅 $\bar{Y} = Y/D$ を示す。超々臨界領域において亜臨界領域における振動実験の結果と同様な結果を示し, 円柱は無次元共振風速 $\bar{V}_{cr} = 3.97$ の附近から急激に振動振幅が増大し, この場合 $\bar{V} = 4.53$ で最大振幅(直径の12%)を示す。この間振動変位の波形はビート状を呈するので, 図にはその最大・最小振幅の幅を示した。さらに風速を上げると逆に急激に振動振幅は減少する。なお図には各風速毎に, 初期設定として静止からおよび加振して大振幅の状態からほぼ定常状態に達した後の値を示した。両者の値は $\bar{V} = 5$ の近傍を除いてほぼ一致している。次にこの場合の円柱の振動変位および後流の速度変動について周波数解析した結果を $\bar{V} = 4.27$ と 5.11 (初期設定: 静止) の場合につき図4に示す。図4aの $\bar{V} = 4.27$ の場合, 円柱の振動数(図a-1)は後流の渦列の周波数(図a-2)と一致しているが, 図4bの $\bar{V} = 5.11$ の場合には, 円柱は $f_c = 2.4 \text{ Hz}$ で振動する(図b-1)が後流の速度変動の支配的な周波数 f_v は図b-2に示すべく円柱の振動数 f_c と相違し, $f_v = 3.05 \text{ Hz}$ でありその St 数は $St = f_v D/V = 0.246$ であることは注目すべきことである。図3には後流の速度変動の周波数(St 数)の変化も示した。風速が \bar{V}_{cr} の近傍から増加して暫く後流の速度変動の周波数 f_v は円柱の振動数 f_c と一致しているが, St 数は \bar{V} に反比例して小さくなるが, さらに風速が大きくと, 振動振幅 \bar{Y} が小さくなると, 円柱が f_c で振動しているが, 後流の速度変動の St 数は静止の場合の後流渦の St 数の値に等しくなる。この様な超々臨界領域において振動する円柱について, ダンパの減衰率 δ_s を $\delta_s = 0.081 \sim 0.319$ の範囲で種々変えて得られた結果を図5a, bに示す。図5aの振動振幅 \bar{Y} は波形がビート状を呈する場合にはその平均値を示した。いずれも \bar{V}_{cr} 近傍から急激に振動が発生し, 減衰率 δ_s の小さい方の程, \bar{Y} は大きく, また \bar{Y} の最大値となる \bar{V} も大きくなり, 本実験の \bar{Y} の最大値(直径の12%)は \bar{V}_{cr} より14%より大きな $\bar{V} = 4.53$ で生じている。また後流の速度変動の St 数も図5bに示すべく減衰率の小さい方の程, 円柱の振動数と一致している範囲が広がっている。この様に超々臨界領域における円柱の振動の様相は \bar{V}_{cr} の値が若干異なること以外, 亜臨界領域における様相と比較して大きな相違はない。

3-2) 局所的 ($\theta = 50^\circ$) に表面粗さ ($d/D = 2.5 \times 10^{-3}$) のある場合。この系の固有振動数は $f_n = 3.09 \text{ Hz}$ であり, 共振風速は $V_{cr} = 6.36 \text{ m/sec}$ である。この Re 数は $Re = 2.5 \times 10^5$ で, この場合も超々臨界領域である(図1)。図6には減衰率が小さく ($\delta_s = 0.030$), 従って振動振幅の比較的大きい場合を示すが, この場合も既に示した全周一樣に表面粗さを貼付した場合と同様な傾向を示している。

参考文献

- 1) 石崎, 中村, 京大防災研年報 5A (1962) 129.
- 2) 元々は Ferguson, N. & Parkinson, G. V., Trans. ASME, B (1967) 831.
- 3) Wootton, L. R., Proc. Inst. Civil Eng., 43 (1969) No. 7/88, 573.
- 4) 相川, 機軸学会論文集 35, 270 (昭40-12), 303, 36, 285 (昭45-5) 751.
- 5) 岡島, 中村, 九大防災研所報 40 (1974).

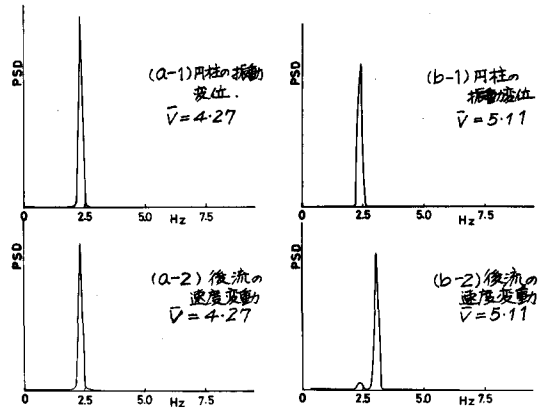
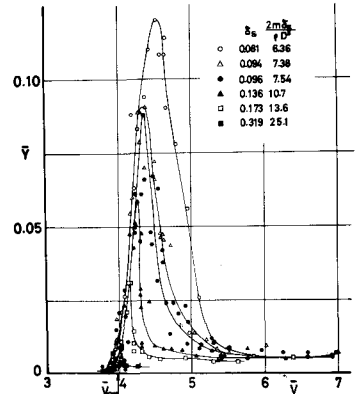
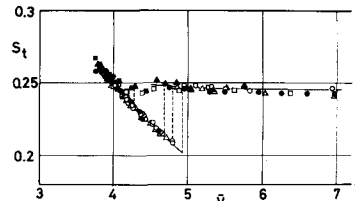


図4. 円柱の振動変位と後流の速度変動のパワースペクトル密度 ($\delta_s = 0.081, 2m\delta_s/\rho D^2 = 6.36$, 全周一樣表面粗さ $d/D = 8.5 \times 10^{-3}$)



(a) 振動振幅 $\bar{Y} (= Y/D)$



(b) 後流の速度変動のストロハル数 St

図5. 弾性支持された円柱の振動振幅 \bar{Y} とストロハル数 St . (全周一樣表面粗さ $d/D = 8.5 \times 10^{-3}$)

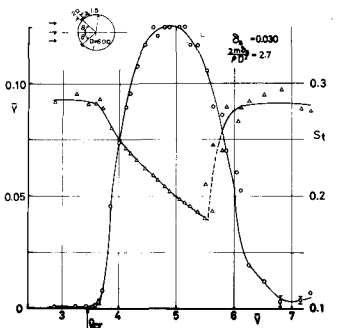


図6. 弾性支持された円柱の振動振幅 \bar{Y} とストロハル数 St . (初期設定: 静止, $\theta = 50^\circ$, 表面粗さ $d/D = 2.5 \times 10^{-3}$)