

一様流中で種々な振動方向に振動する円柱

岡島, 厚

九州大学応用力学研究所 : 助教授

杉谷, 賢一郎

九州大学応用力学研究所 : 文部技官

<https://doi.org/10.15017/4743660>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 57, pp.229-245, 1982-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



一様流中で種々な振動方向に振動する円柱

岡 島 厚*
杉 谷 賢 一 郎†

概 要

一様流中で、両端弾性支持した円柱の振動方向が流れに対し直角な方向および流れの方向さらに斜めの場合について、渦励振による円柱の振動挙動や後流の速度変動のスペクトル等を調べた。

最も一般的な、振動方向が流れに直角な場合、共振風速付近からの円柱の発振の様子、後流と円柱の振動との locking-in の様子、さらに高風速域における後流のスペクトル等の詳細な資料を得た。

また、振動方向が斜め (75° , 45°) の場合、励振振幅は急激に小さくなること。

振動方向が流れの方向の場合、共振風速の $1/2$ や $1/3$ 付近で励振が生ずる様子を明らかにした。

Key words: Vortex excitation, Locking-in, In-line oscillation, Vortex induced vibration

1. ま え が き

一様流中にある円柱の後流渦による流れに直角な方向の振動については、今日まで数多くの研究が成されている¹⁾。しかし円筒状部材からなる鉄塔構造物などでは部材の連結の仕方によっては、流れに対し種々な角度の振動方向を有する場合が多い。そのような場合の部材の結合部の設計の基礎となるような資料は非常に僅かである。Tanida ら²⁾は比較的低いレイノルズ数範囲 ($R_0=80\sim 4,000$) であるが油の中や水中で円柱を強制的に流れ方向および流れに直角な方向に加振させ、その時の円柱に働く流体力や振動円柱後流の周波数を測定している。また King ら³⁾は潮流中における海洋構造物の振動を調べるため、流れ方向または流れと直角な方向に自由振動し得るように片持弾性支持された円柱模型について、その振動系の減衰比率を種々変え、振動変位および後流渦の周波数を測定し、同時に、振動円柱周りの流れの可視化観察を行っている。

そこで本研究では、流れに直角な方向、流れ方向そして流れに対し、 75° , 45° , 15° の角度を持ち、斜めの方向に振動するように模型円柱を両端弾性支持した。そして模型円柱の発振の様相、振動円柱の挙

* 九州大学助教授, 応用力学研究所

† 九州大学応用力学研究所文部技官

動, 振動円柱後流の周波数等を詳細に調べた。

その結果, 流れと直角な方向に振動する円柱については, 共振風速付近における発振の様子, 後流の速度変動と円柱の振動との locking-in の様相, さらに高風速域における後流のスペクトル等の詳細な資料を得た。また, 振動方向が流れに対し, 75° あるいは 45° の場合には, 振動振幅は小さくなること, 振動方向が流れ方向と一致する場合, 共振風速の $1/2$ あるいは $1/3$ の風速域付近で励振が生ずる様子などを明らかにした。

2. 実験装置と実験方法

実験には回流型低速風洞を用い, 図 1 に示すように風洞測定部 (高さ 4 m, 幅 2 m の断面) に直径 $D=30$ cm, スパン長さ 2 m の模型円柱①を設置する。模型円柱は重量軽減のため発泡スチロール製の中空円筒の囲りに 0.3 mm の厚さのアルミ薄板を被覆したものである。模型両端は 2 枚 1 対の板ばね② (厚さ 5 mm, 幅 10 cm, 長さ 150 cm) とそれに直角方向上下につけたコイルばね③によって弾性支持されている。模型円柱の振動方向 α は図に示すように板ばねとコイルばねの設置位置を変えることによって $\alpha=90^\circ, 75^\circ, 45^\circ, 15^\circ, 0^\circ$ に変えた。

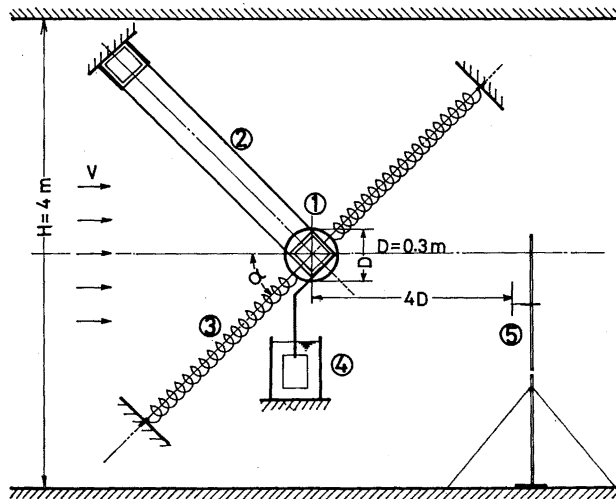


図 1 振動模型円柱の概略図

- | | |
|-------------|--------------|
| ① 模型円柱 | ② 板ばね |
| ③ コイルばね | ④ 粘性平行板式ダンパー |
| ⑤ 熱線流速計プローブ | |

なお, この種の実験では振動模型端部の隙間の影響は無視し難いが, 本実験では模型の端板を風洞測定部の内・外壁によって挟み込み, さらにその間隙を出来るだけ狭くして, 隙間の影響を軽減した。組立てられた振動模型円柱系の固有振動数は $f_0=3.17$ Hz (あるいは 3.47, 4.375 Hz) であり, 振動系の対数減衰率 δ を変えるには粘性平行板式ダンパー④を用いた。ここで用いたダンパーは狭い隙間の

表 1 主な振動実験条件

α 振動方向	f_c Hz 固有振動数	δ 減衰率	$2m\delta/\rho D^2$ 減衰比率	実験名	\bar{V}_{cr} 共振風速
90°	3.17	0.0263~0.215	5.26~43.0	T	5.26
75°	3.47	0.0256~0.076	5.12~15.2	Z	5.41
45°	3.47, 4.375	0.0075~0.0523	1.50~10.5	200 δ Y	5.26
15°	3.47	0.0090	1.8	Z	5.26
0°	3.47, 4.375	0.0095, 0.0070	1.6, 1.9	X	5.26

(注) 共振風速におけるレイノルズ数 $R_e = (1 \sim 1.4) \times 10^5$ (亜臨界域)

ある器の中に薄いアルミ板を挿入し、その板と器の間にトルコン油を入れたもので、アルミ板の大きさを変えることによって振動系の減衰率 δ を変えた。

振動模型の振動変位は板ばねに貼付した歪ゲージによって検出し、後流の速度変動の測定には熱線流速計プローブ⑥を用い、適宜その位置を移動させたが、主として円柱中心から直径の約4倍下流の位置で検出した。

なお、振動実験の主な条件を表1にまとめて示す。

3. 実験結果

3.1. 振動方向が流れに直角な場合 ($\alpha=90^\circ$)

まず振動方向が流れに直角な方向の場合の結果を示す。この場合、振動円柱の固有振動数は $f_c = 3.17$ Hz でこの振動数が静止の際のカルマン渦列の周波数 f_K と一致する、いわゆる共振風速は $V_{cr} = 5.0$ m/s であり、(無次元)共振風速表示では $\bar{V}_{cr} (\equiv V_{cr}/f_c \cdot D) = 5.26$ となる。この時のレイノルズ数は $R_e (\equiv V_{cr} \cdot D/\nu)$ 、ここで ν は空気動粘性係数 $= 1.0 \times 10^5$ であり、本実験は亜臨界域に限られている。以下、風速 V は $(f_c \cdot D)$ で無次元化して $\bar{V} = V/f_c D$ で表示する。

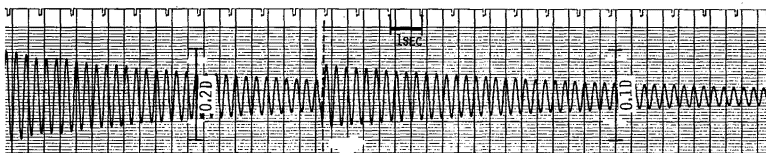


図 2 静止空気中における振動模型円柱の振動変位記録波形 (実験 T-5, $\delta = 0.0316$, $\alpha = 90^\circ$)

図2には振動模型の静止空気中における減衰の様子(実験 T-5)を示すが、この場合の対数減衰率 δ は 0.0316, $2m\delta/\rho D^2$ (ここで m は模型の単位スパン長さ当りの質量, ρ は空気密度) で表示される減衰比率は 6.32 である。図 3-1~図 3-10 には、このような自由振動模型に対し、風速を共振風速付近の $\bar{V} = 4.73$ から 8.41 まで変えた時の模型円柱の振動挙動および後流速度変動のパワー・スペクトル密度分布の変化の様子を示す。まず、共振風速より低い $\bar{V} = 4.73$ の場合、図 3-1 (a) に示す約 100 秒間にわたる振動振幅記録に見る如く、 $f_c = 3.17$ Hz の模型自身の固有振動数と図 3-1 (b) に示

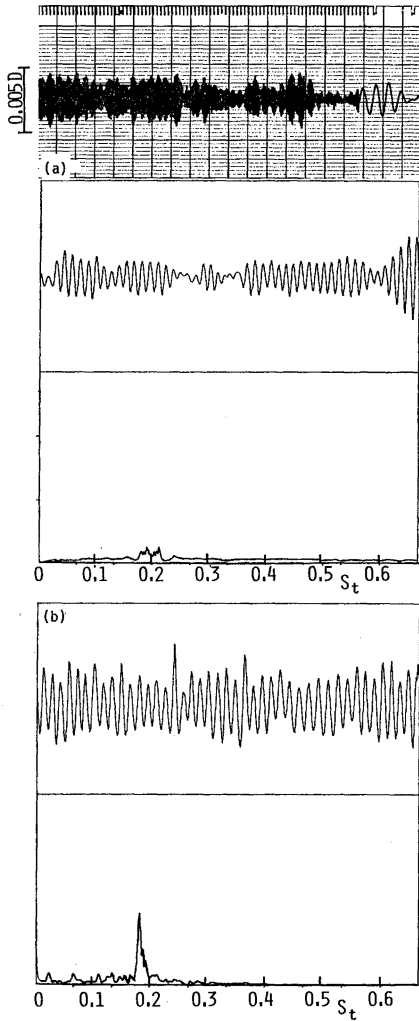


図 3-1. $\bar{V} = 4.73$ (4.5 m/s)

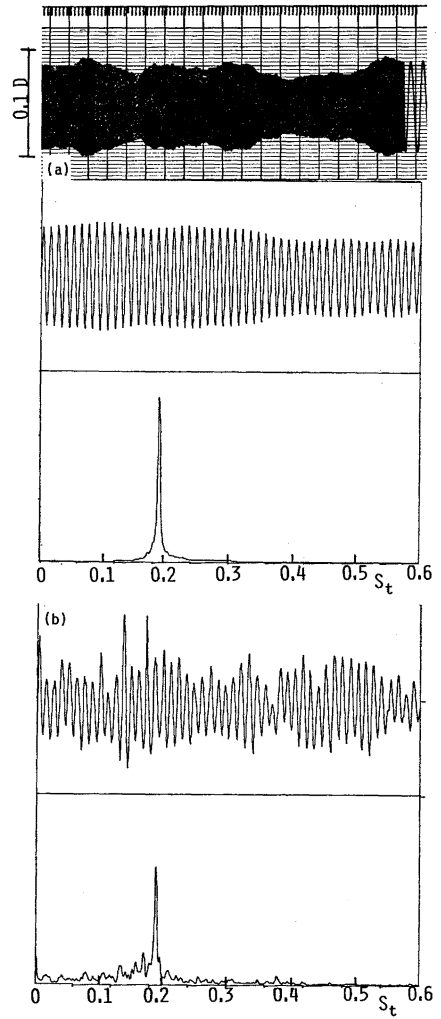


図 3-2. $\bar{V} = 5.26$ (5.0 m/s)

図 3 流れと直角な方向に振動する円柱の (a) 振動変位と (b) 後流の速度変動の記録波形とパワー・スペクトル密度分布 ($T=5$, $\delta=0.0316$, $\alpha=90^\circ$)

すストローハル数 (S_t 数, $S_t \equiv f_w D / \bar{V}$, f_w は後流の速度変動の周波数) 0.19 のカルマン渦列により、円柱はビート状を呈して振動しているが、その振動は非常に僅かで、ほとんど振動していない状態である。

風速が共振風速に近づく ($\bar{V} = \bar{V}_{cr} = 5.26$) と、図 3-2 に示すごとく模型は発振する。図 (a) の 100 秒間程度の比較的長時間の記録を見ると、振幅は一定ではないが、後流速度変動及び振動変位のスペクトルは鋭いピーク状を呈している。さらに風速の増加に伴い、振動振幅は増大し、 $\bar{V} = 5.68$ (図 3-

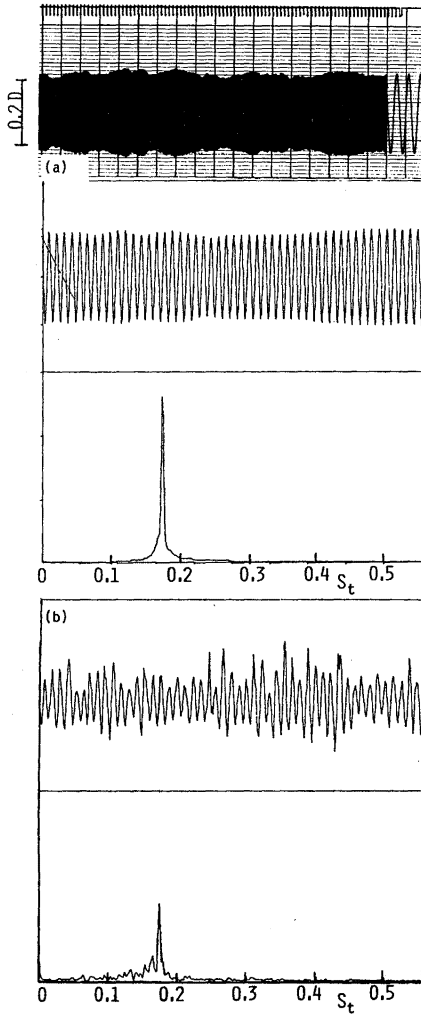


図 3-3. $\bar{V} = 5.68$ (5.4 m/s)

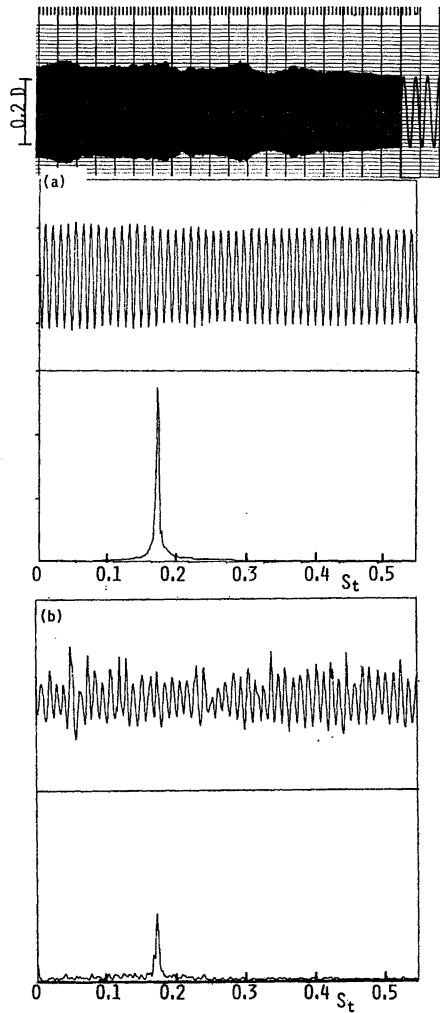
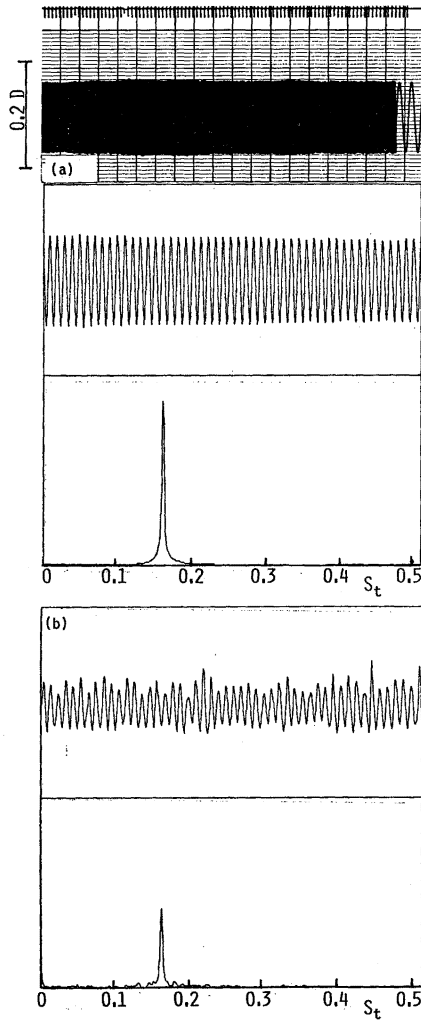
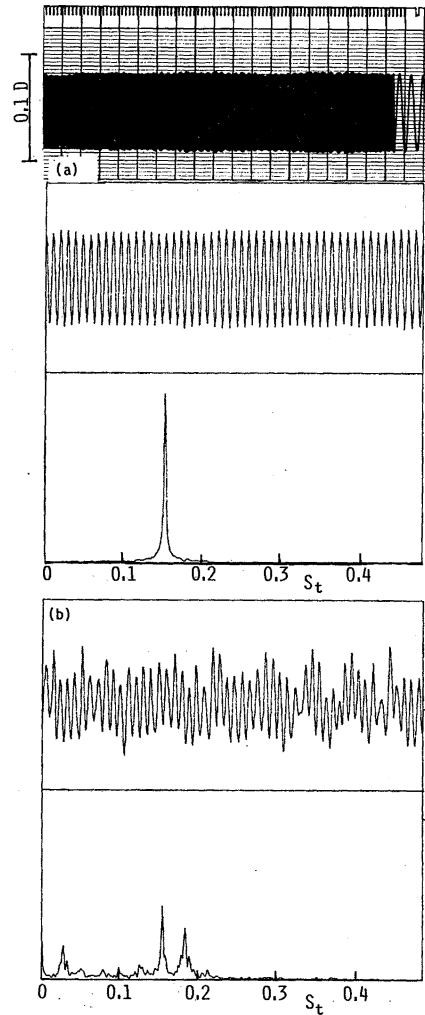


図 3-4. $\bar{V} = 5.78$ (5.5 m/s)

3) そして $\bar{V} = 5.78$ (図 3-4) で振幅は最大に達する。いずれの場合にも模型は固有振動数 f_c で振動し、振動振幅は大きい。しかし長時間の記録波形の振動振幅は若干変化している。また、後流の周波数 f_w は模型の振動数 f_c に一致し、いわゆる locking-in している。さらに風速が増加し、 $\bar{V} = 6.10$ (図 3-5) では振動振幅は減少するが、その振動波形は図 (a) に示すごとく、振幅は長時間に亘り一定である。この場合も後流渦の周波数は模型の振動数に等しい。そして $\bar{V} = 6.52$ (図 3-6) の場合、円柱の振幅は小さくなるが、長時間に亘り振幅の変動はほとんどない。一方図 (b) の後流の速度変動には 2 種類の卓越 S_t 数成分が現れ、その一つは $S_t = 0.19$ のカルマン渦列によるもの、もう一つの成分は模型円柱の振動によるものである。この場合、後者に依るピークの大きさが若干大きい。さらに高

図 3-5. $\bar{V} = 6.10$ (5.8 m/s)図 3-6. $\bar{V} = 6.52$ (6.2 m/s)

風速になると ($\bar{V} = 6.73$, 図 3-7), 後流の速度変動 (図 3-7 (b)) のスペクトル密度分布には, カルマン渦列の周波数成分の方が支配的となるが, 未だ円柱の振動による成分も認められる. 一方図 (a) の円柱の振動にはカルマン渦列による成分は全く認められず, 振幅は一定を保っている. $\bar{V} = 6.94$ (図 3-8), $\bar{V} = 7.36$ (図 3-9) になると, 振動振幅は直径の 1% 以下になり, かなり減衰し後流の速度変動にはカルマン渦列による成分のみ卓越している. $\bar{V} = 8.41$ (図 3-10) の高風速域では円柱の振動はほとんど止まり (振動振幅は高々直径の 0.3% 以下), 後流の速度変動はカルマン渦列によるもののみである. また, いずれの場合にも, 円柱の振動スペクトル密度分布には渦列による成分は非常に僅かである.

図 4 には減衰比率を $2m\delta/\rho D^2 = 5.26 \sim 43.0$ の範囲で変えた時の (無次元) 風速 \bar{V} に対する円柱の

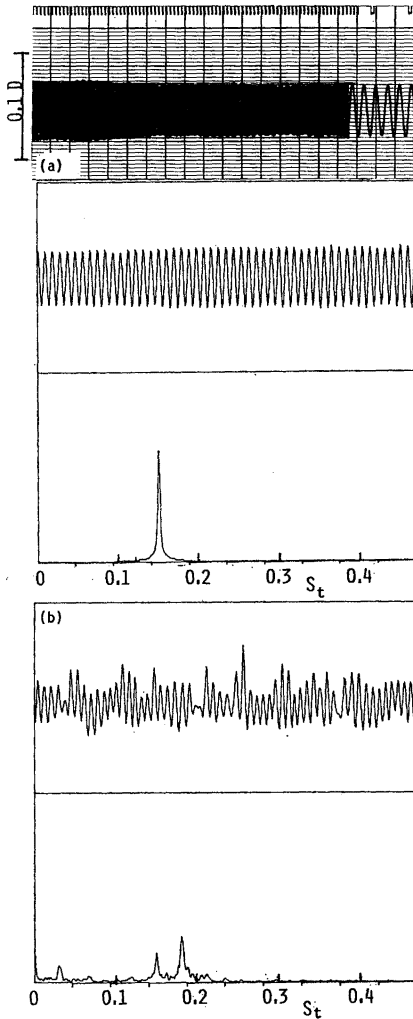


図 3-7. $\bar{V}=6.73$ (6.4 m/s)

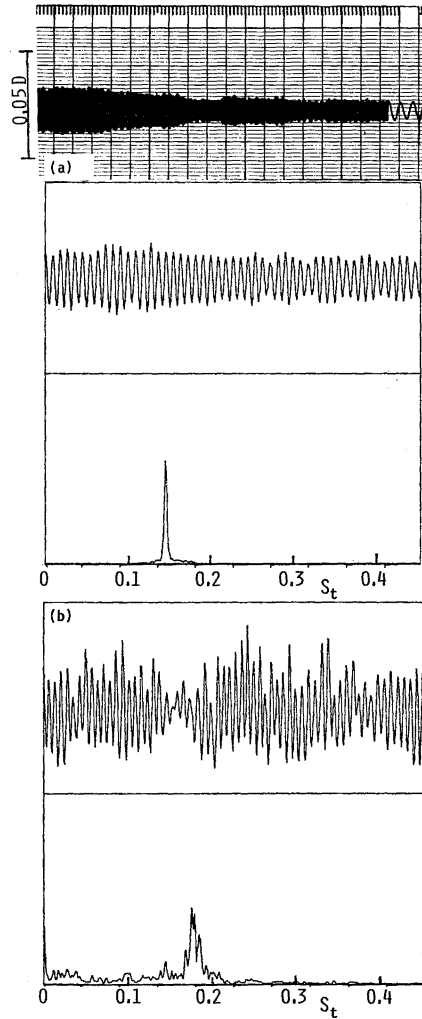


図 3-8. $\bar{V}=6.94$ (6.6 m/s)

(無次元) 応答振幅 η_{RMS} (%) および後流中の速度変動の卓越 S_t 数をまとめて示す。なお、 η_{RMS} (%) は記録波形の約 300 周期以上に亘る円柱の振動片振幅の RMS 値を直径 D で無次元化し、% 表示したものである。図から、いずれの減衰比率の場合にも、共振風速 $\bar{V}_{cr}=5.26$ 付近から発振し、 \bar{V} の増加に伴い、振幅 η_{RMS} は増大している。また、既に図 3-3～図 3-5 の例で述べた如く、後流の速度変動の卓越周波数 f_w は模型円柱の振動数 f_c に等しく、減衰比率によって相違するが、 \bar{V} のかなり広い範囲にわたり、後流渦は円柱の振動に同期していることがわかる。従って図 4 (b) で S_t 数値は風速 \bar{V} に反比例して小さくなる。

また、図 3-6, 3-7 の例で示したような後流の速度変動のパワー・スペクトル密度分布には円柱の

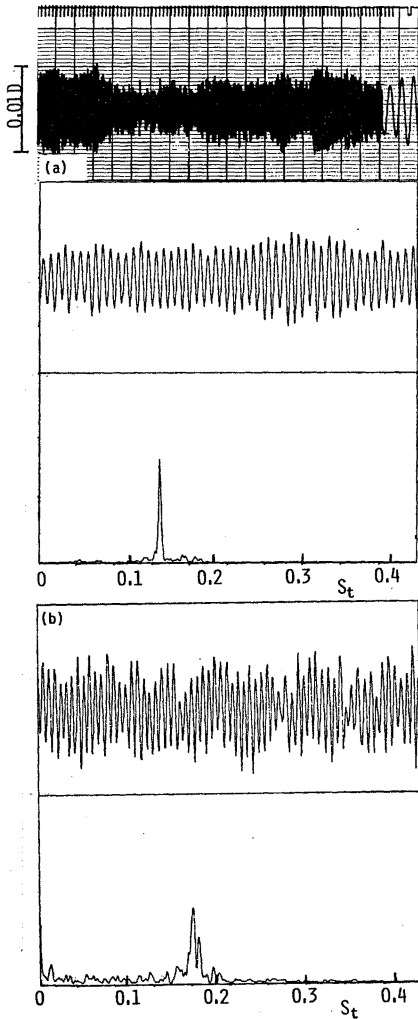


図3-9. $\bar{V} = 7.36$ (7.0 m/s)

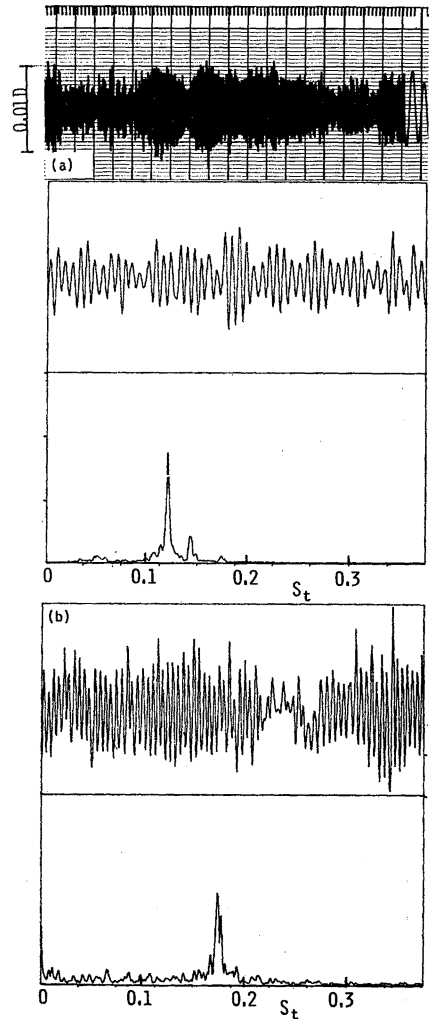


図3-10. $\bar{V} = 8.41$ (8.0 m/s)

図3 流れと直角な方向に振動する円柱の (a) 振動変位と (b) 後流の速度変動の記録波形とパワー・スペクトル密度分布
(T-5, $\delta = 0.0316$, $\alpha = 90^\circ$)

振動数とカルマン渦の周波数の2種類の卓越 S_t 数が現われるので、図4(b)には、同一の \bar{V} の値に対し、その2つの S_t 数値を記入した。さらに高風速域では、 γ_{RMS} は小さくなり、後流の速度変動の S_t 数値はカルマン渦列の周波数 ($S_t = 0.19$) に復帰する。

全体的に見て、減衰比率が大きくなるに従い、 γ_{RMS} は一様に小さくなるが、 γ_{RMS} の値が最大となる \bar{V} の値は一定ではなく、 \bar{V}_{cr} の値に近づく傾向を示す。また後流渦と円柱の振動が locking-in する \bar{V} の範囲も狭くなっていることが図4から明らかである。

3.2. 振動方向が斜め ($\alpha=75^\circ, 45^\circ$) の場合

模型円柱の振動方向が流れに対し、 $\alpha=75^\circ$ の傾きを持っている場合の応答振幅 η_{RMS} 、および後流の

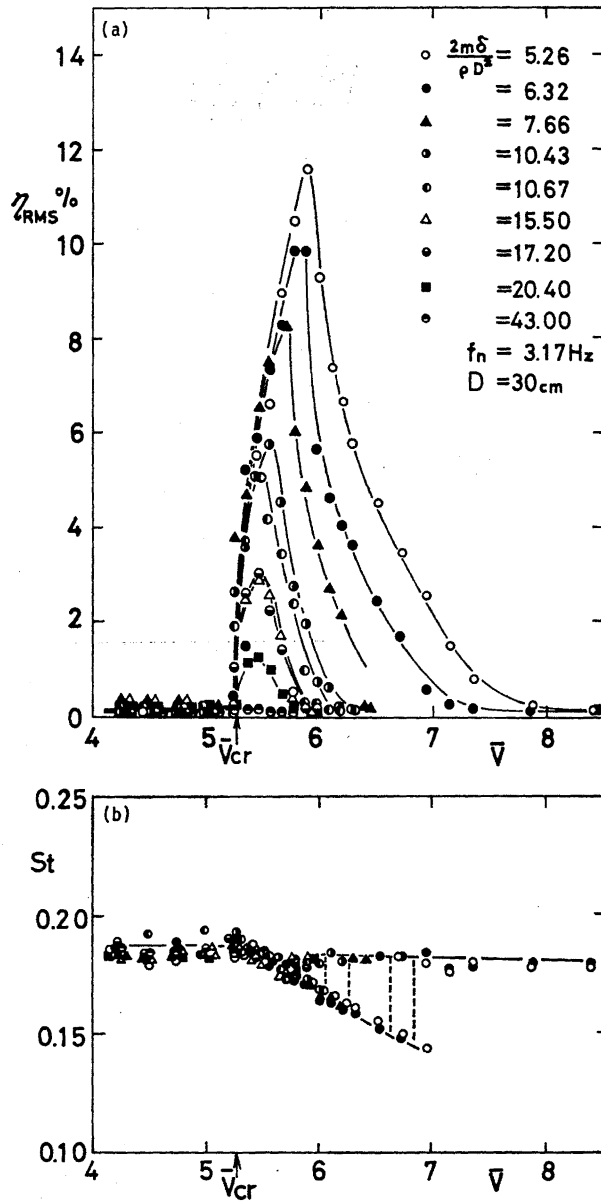


図 4 流れと直角方向に振動する円柱の (a) 応答振幅 $\eta_{RMS}(\%)$ と (b) 後流の速度変動の St 数
($\alpha=90^\circ$, $2m\delta/\rho D^2=5.26\sim 43.0$)

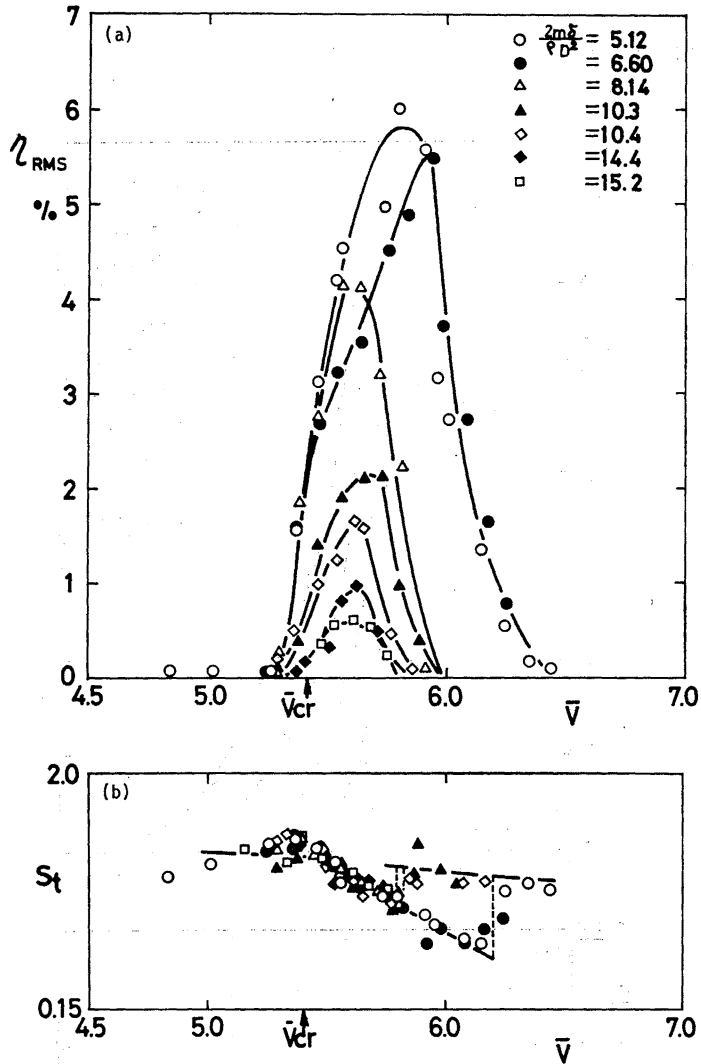


図5 斜め方向に振動する円柱の (a) 応答振幅 $\eta_{RMS}(\%)$ と (b) 後流の速度変動の St 数
 ($\alpha=75^\circ, 2m\delta/\rho D_2=5.12\sim 15.2$)

速度変動の St 数を図5に示す。いずれの減衰比率の場合にも共振風速 ($\bar{V}_{cr}=5.41$) 付近から模型は発振し、風速増加に伴い、 η_{RMS} は増大すると共に、後流の速度変動の周波数は模型の振動数に同期する。勿論その locking-in する \bar{V} の範囲は減衰比率によって相違する。

次に、図6に、振動方向が $\alpha=45^\circ$ の場合を示す。この場合、振動振幅はかなり小さいので、実験に当っては減衰比率の範囲を $2m\delta/\rho D^2=1.5\sim 10.5$ とした。また $\alpha=45^\circ$ の場合でも試験風速を広い範囲 ($\bar{V}=0\sim 7.0$) に変えても、上記減衰比率の範囲内では、例えば $\bar{V}_{cr}/2(=2.6)$ や $\bar{V}_{cr}/3(=1.75)$

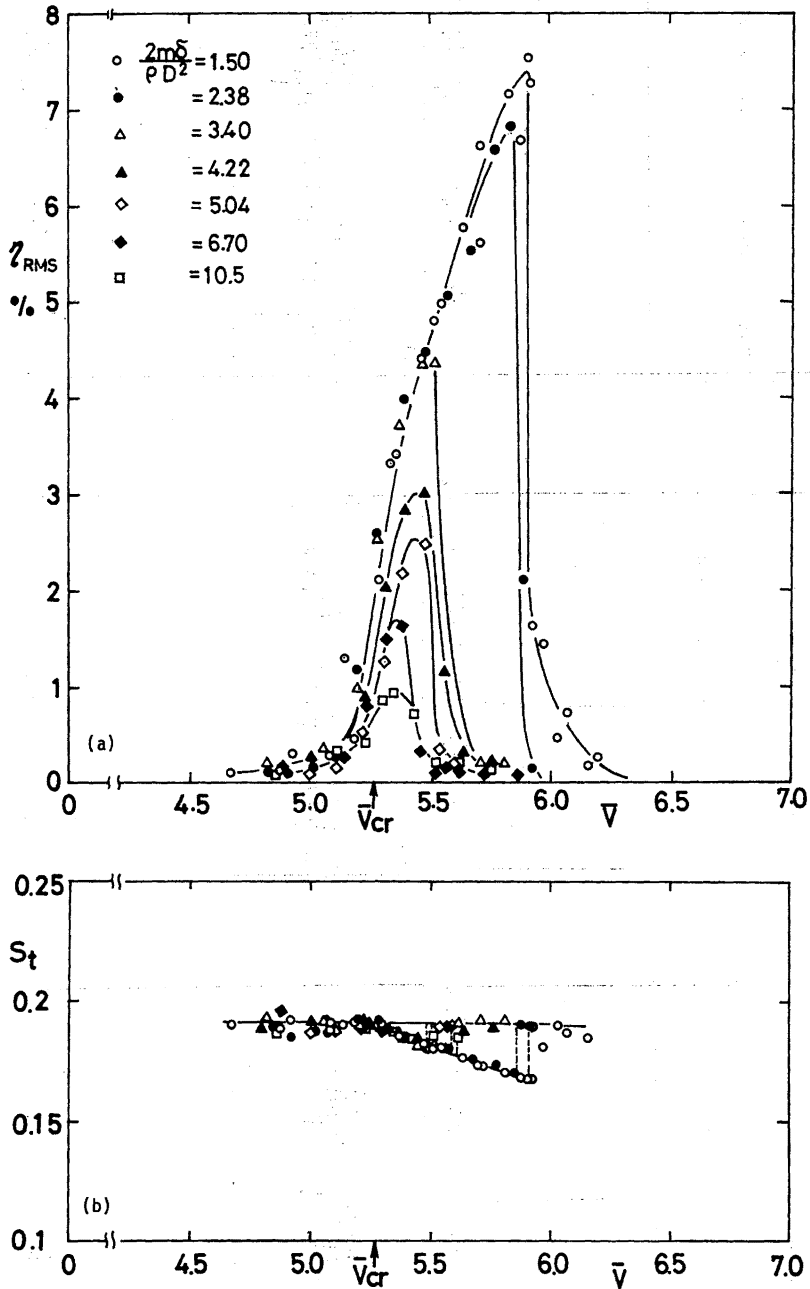


図 6 斜め方向に振動する円柱の (a) 応答振幅 $\eta_{RMS}(\%)$ と (b) 後流の速度変動の St 数
 ($\alpha = 45^\circ$, $2m\delta/\rho D^2 = 1.50 \sim 10.5$)

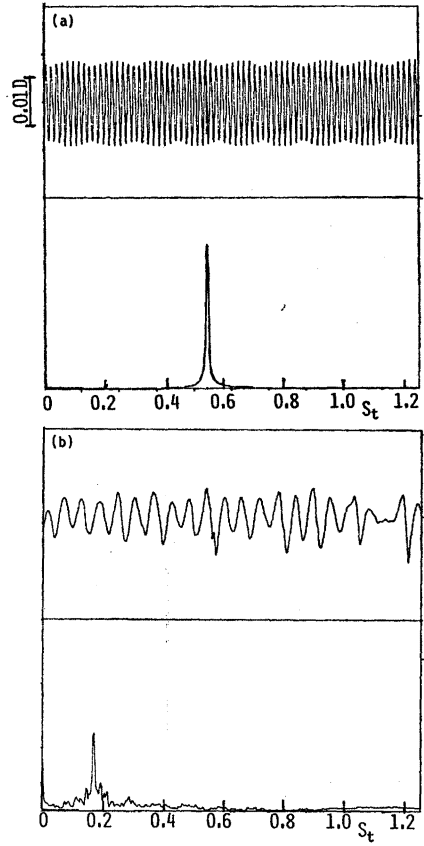


図 7-1. $\bar{V} = 1.75$ (2.3 m/s).

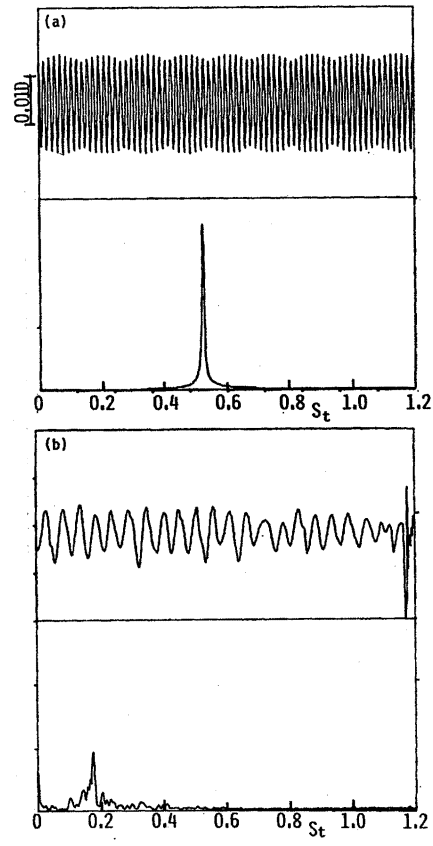


図 7-2. $\bar{V} = 1.91$ (2.5 m/s).

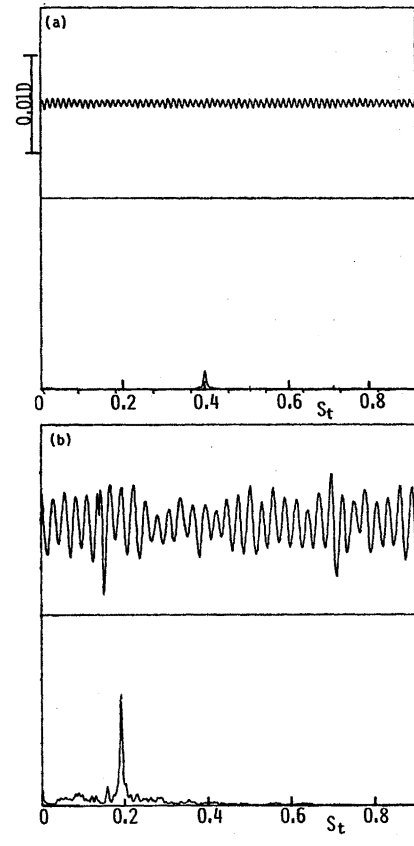


図 7-3. $\bar{V} = 2.52$ (3.3 m/s).

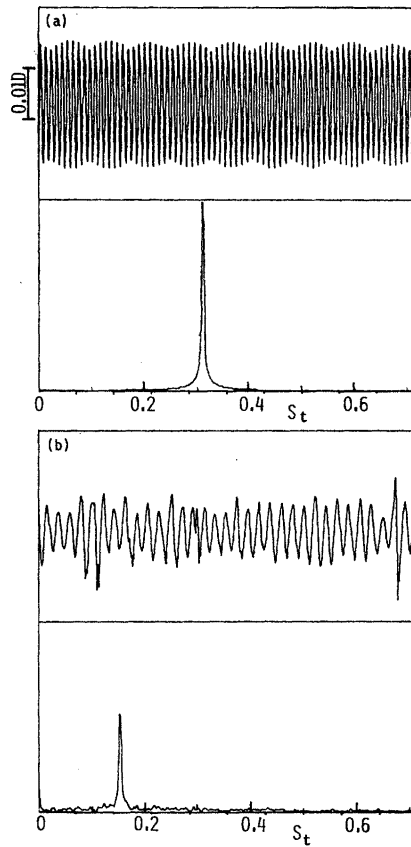


図 7-4. $\bar{V} = 2.75$ (3.6 m/s).

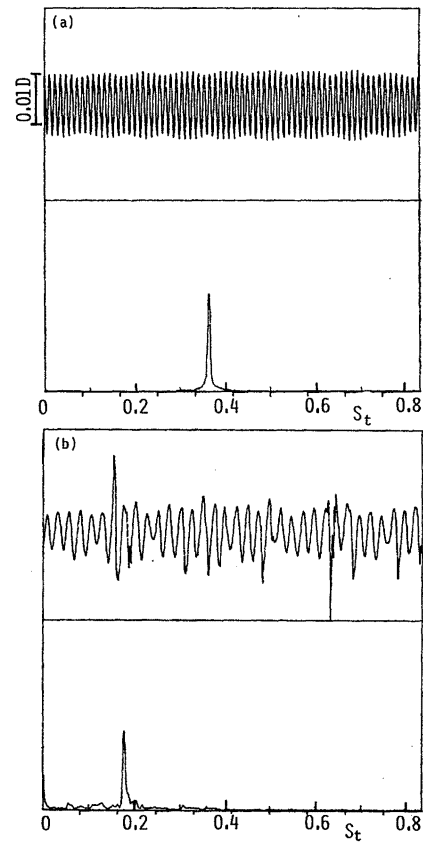


図 7-5. $\bar{V} = 3.21$ (4.2 m/s).

図 7 流れ方向に振動する円柱の (a) 振動変位と (b) 後流の速度変動の記録波形とパワー・スペクトル密度分布 ($X=2$, $\delta=0.0070$, $\alpha=0^\circ$).

では円柱は発振せず、図に示す如く $\bar{V}=5.0\sim 6.5$ 付近の風速域においてのみ発振する。この場合 $\alpha=75^\circ, 90^\circ$ の場合と同様な応答特性を呈するが、特に減衰比率の極端に小さい $2m\delta/\rho D^2=1.50, 2.38$ などの場合、最大振幅となる $\bar{V}(\sim 5.9)$ の値から更に僅か風速を上げると、急激に振幅が減衰する。

しかし、全般的に見て、 $\alpha=75^\circ, 45^\circ$ のように斜め方向に振動する場合、同一の減衰比率に対する応答振幅は $\alpha=90^\circ$ の場合と比較して、かなり小さくなるが、 \bar{V}_{cr} 付近からのみ円柱は発振すること、風速の増加に伴い応答振幅は増大し、また後流は円柱の振動に locking-in することなど $\alpha=90^\circ$ の渦励振の挙動と大きな差異は認められない。

3.3. 振動方向が流れ方向 ($\alpha=0^\circ$) および $\alpha=15^\circ$ の場合

円柱の振動方向が流れ方向と一致する場合、減衰比率を極めて小さく $2m\delta/\rho D^2=1.6$ にしても、共振風速 $\bar{V}_{cr}(=5.26)$ 付近では発振せず、その $1/2$ ($\bar{V}_{cr}/2=2.63$) 前後の低風速域で不安定が生ずる。図7には円柱の流れ方向の振動挙動とその後流の速度変動のスペクトル密度分布の変化を示す。

図7-1は $\bar{V}=\bar{V}_{cr}/3=1.75$ の場合で、模型の振動振幅は直径の $1\sim 2\%$ 程度で小さいが、長時間に亘りほぼ一定である。風速増加に伴い、振幅は幾分か大きくなり、 $\bar{V}=1.9$ 付近で最大 ($\eta_{RMS}=1.6\%$) となる。また、後流の速度変動は模型の振動数の $1/3$ に locking-in している(図7-2, $\bar{V}=1.91$)。更に風速を増すと振幅は減少し、図7-3の $\bar{V}=2.52$ は $\bar{V}_{cr}/2$ に近い場合であるが、図に示すごとく、後流にはカルマン渦列が形成されているが、模型はほとんど振動していない。しかし更に風速を増すと再び発振し始める。図7-4 ($\bar{V}=2.75$)、7-5 ($\bar{V}=3.21$) に示すように模型の振動振幅は漸増するが、高々 $\eta_{RMS}=2\%$ 程度である。この場合にも振幅は長時間に亘り、ほぼ一定を保っている。一方後流の速度変動はいずれも模型の振動に locking-in している。

図8には $2m\delta/\rho D^2=1.6$ と 1.9 の場合につき \bar{V} に対する応答振幅 η_{RMS} と後流の速度変動の周波数 f_w/f_c をまとめて示す。この場合、減衰比率を極端に小さくしてあるが、共振風速 $\bar{V}_{cr}=5.26$ 付近では、円柱は発振せず、その ($\bar{V}_{cr}/2$) 前後の低風速域で不安定が生じている。しかし、その応答振幅は小さく、高々直径の 2% 程度である。しかも ($\bar{V}_{cr}/2$) 前後の $\bar{V}=1.75\sim 2.4$ と $2.6\sim 3.3$ 付近の2カ所の風速域で不安定が生ずる。この現象は King³⁾ の実験結果にも見られ、特に \bar{V} の低い方の不安定域の振動時には対称渦が生じていることが可視化観察により見出されている。後流の速度変動の周波数は図8(b)に示すごとく、($\bar{V}_{cr}/2$)=2.6 から高風速域の $\bar{V}=2.6\sim 3.3$ の不安定域では $f_w/f_c=1/2$ で一定であり、比較的広い風速範囲に亘り、後流渦の周波数は円柱の振動数の $1/2$ に locking-in している。

さらにもう一つ不安定域は $\bar{V}_{cr}/3=1.75$ と $\bar{V}_{cr}/2$ の間で生ずる。この領域では比較的狭い範囲であるが $f_w/f_c=1/3$ の一定値を示している。この場合、円柱の流れ方向の振動の振動数の $1/3$ に locking-in し、後流渦が形成されている。なお、図8(a)中、 $\bar{V}=3.17$ における矢印は $\eta_{RMS}=1.3\%$ 以上の振動振幅で加振した場合には発振し、 $\eta_{RMS}=1.0\%$ 以下では減衰することを表示しており、狭い風速範囲であるが不安定なリミット・サイクルが存在する。

一方、振動方向が $\alpha=15^\circ$ の場合は図9に示すごとく励振の生ずる風速域は $\bar{V}_{cr}/2$ より低速域の $\bar{V}=1.9\sim 2.6$ の1カ所で、 $\bar{V}_{cr}/2$ より高風速域では $\alpha=0^\circ$ の場合と異り、もはや、円柱の振動は起ら

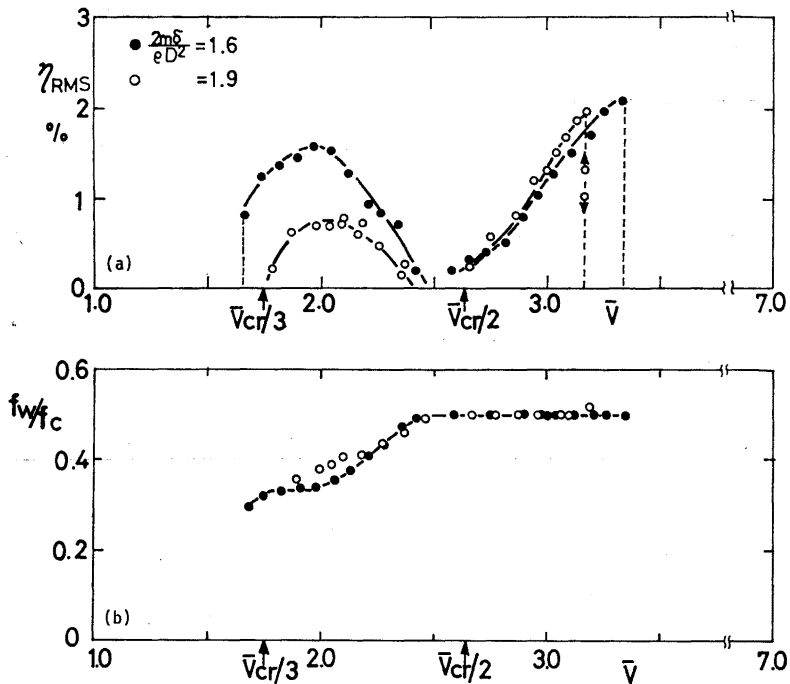


図 8 流れ方向に振動する円柱の (a) 応答振幅 $\eta_{RMS}(\%)$ と (b) 後流の速度変動の周波数 (f_w/f_c), ($\alpha=0^\circ$, $2m\delta/\rho D^2=1.6, 1.9$).

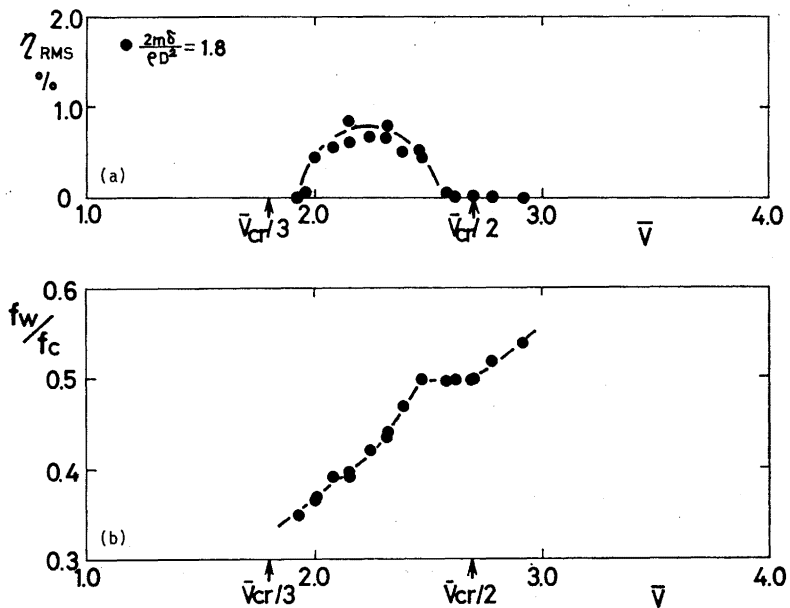


図 9 斜め方向に振動する円柱の (a) 応答振幅 $\eta_{RMS}(\%)$ と (b) 後流の速度変動の周波数 (f_w/f_c), ($\alpha=15^\circ$, $2m\delta/\rho D^2=1.8$).

なくなることは注目される。また $\bar{V}=1.9\sim 2.6$ における励振の際の、後流の速度変動の周波数が模型の振動に locking-in する \bar{V} の範囲はかなり狭い。

3.4. 減衰比率に対する応答振幅

一様流中で両端弾性支持された円柱の振動方向が流れに対し、直角な場合 ($\alpha=90^\circ$)、斜めの場合 ($\alpha=75^\circ, 45^\circ, 15^\circ$) そして流れ方向の場合 ($\alpha=0^\circ$) につき、種々な減衰比率, $2m\delta/\rho D^2$ に対する応答振幅の最大値を図10にまとめて示す。図には Scruton¹⁾ による流れに直角方向に振動する円柱の実験結果も示すが、同一条件の本実験結果 ($\alpha=90^\circ$) と良く一致している。また振動方向 α が変わると応答振幅は急激に減少することがわかる。特に流れ方向の振動振幅は直角方向に比べ、非常に僅かである。

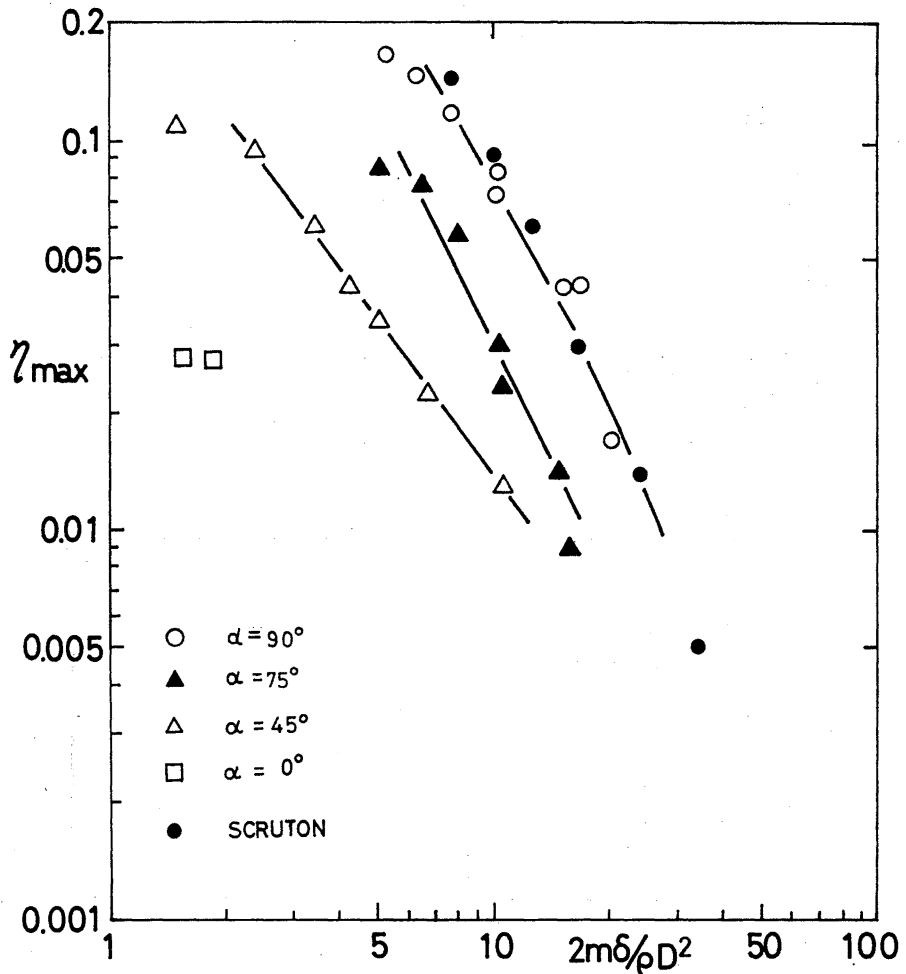


図10 減衰比率に対する応答振幅の最大値 η_{max} .

4. 結 論

一様流中で、両端弾性支持した円柱の振動方向が流れに対し、直角な方向 ($\alpha=90^\circ$)、流れの方向 ($\alpha=0^\circ$) さらに斜め ($\alpha=75^\circ, 45^\circ, 15^\circ$) の場合について、渦励振による円柱の振動挙動や後流の速度変動のスペクトル等を調べた。

得られた主な結論は次の通りである。

1) 流れと直角な方向に振動する場合 ($\alpha=90^\circ$)、共振風速付近から発振し、風速増加と共に、振動振幅は増大し後流渦の周波数は円柱の振動数と locking-in するが、やがて振動振幅は減少する。その場合の後流の速度変動にはカルマン渦の周波数成分と円柱の振動の成分の2種類の成分が現れる。このような風速変化に対する円柱の振動挙動および後流の変化を詳細に述べた。

2) 振動方向が斜めの場合 ($\alpha=75^\circ, 45^\circ$) でも、共振風速付近における発振の様子や励振挙動は $\alpha=90^\circ$ の場合と変わらないが、振動振幅は $\alpha=90^\circ, 75^\circ, 45^\circ$ の順に急激に減少する。

3) 振動方向が流れ方向に近い場合 ($\alpha=0^\circ, 15^\circ$) には、共振風速付近では発振せず、共振風速の $1/2$ ($\alpha=0^\circ$)、あるいは $1/3$ ($\alpha=0^\circ, 15^\circ$) 付近の低風速域で発振し、その振動挙動、後流の様相を明らかにした。

故田才福造先生は平素から物体に作用する流体力に関する実験には深い御関心を示されました。先生は一昨年(1980年)秋、御病床にありながら、小生の拙文をお読み頂き、研究室に御質問を下さいました。当時小生は外国出張中のため、直接御回答を致すことが出来なかったことは、今でも心残りに思うことです。ここに謹んで先生の御冥福をお祈り申し上げます。

最後に、本研究中、御指導御鞭撻頂いた中村泰治教授始め、御討議、御協力頂いた流体工学部門の諸氏並びに津屋崎海洋災害実験所風洞関係の諸氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Scruton, C., "On the wind-excited oscillations of stacks, towers and masts," Proc. Wind effects on Buildings and Structures, vol. II, (1963) 798.
- 2) Tanida, Y., Okajima, A. and Watanabe, Y., "Stability of circular cylinder oscillating in uniform flow or in a wake," J. Fluid Mech., vol. 61, (1973) 769.
- 3) King, R., Prosser, M. J. and Johns, D. J., "On vortex excitation of model piles in water," J. Sound Vib., vol. 29(2), (1973) 169.

(昭和57年5月31日 受理)