

振動流中に置かれた円柱の渦励振動量について

Vortex-excited Vibration of a Circular Cylinder in Planar Oscillatory Flow

林建二郎*・田中克也**・重村利幸*・藤間功司*

Kenjiro Hayashi, Katsuya Tanaka, Toshiyuki Shigemura, Koji Fujima

Laboratory experiments have been performed to study the vortex-excited vibration of a circular cylinder in planar oscillatory flow. The variations of transverse response of the cylinder with the frequency ratio f_0/f_w (f_0 : frequency of oscillatory incident flow, f_w : natural frequency of the test cylinder in still water) and Keulegan-Carpenter number, KC, as the function of Scruton number are obtained in the range of $3 < KC < 20$. The vortex-excited vibration occurs in the range of $4 < KC$. The non-linear phenomena caused by the fluid-structure interaction are discussed.

Keywords: Vortex-excited vibration, Circular cylinder, Fluid-structure interaction, Scruton number

1. はじめに

柱状な海洋構造物の設計においては、作用波力の大きさに対する静的な検討に併せて、振動外力である作用波力に対する構造物の振動応答問題をも検討する必要がある。柱状な海洋構造物に作用する波力としては、波の進行方向に作用する進行方向波力 F_x とその直角方向に作用する揚力 F_y がある。揚力 F_y の大きさは進行方向波力 F_x に比べて全般的には小さいが、 F_y の卓越周波数は F_x の卓越周波数 (=作用波の周波数) の整数倍である。その倍数値は、Keulegan-Carpenter 数の増加に伴い階段状に増加する。従って、柱状な海洋構造物が揚力と共振する可能性は高く、工学的にも重要な問題であり十分に検討する必要がある。円柱からの後流渦の非定常性によって生じる変動揚力によるこの振動は「渦励振動」と呼ばれ自励振動の一種である¹⁾。

一方向流中に置かれた柱状構造物の渦励振動問題に関しては、過去多くの研究がなされ、流れと振動する円柱との相互作用による非線形な振動応答特性が明らかにされている。工学的に必要な渦励振動量の推定においては、この相互作用による作用揚力の増加現象を的確に評価することが重要な課題である²⁾。

柱状な海洋構造物の渦励振動問題においても、この流れと構造物との相互作用による複雑で非線形な振動応答が生じる現象が、波動場や振動流中における円柱の渦励振動に関する室内模型実験により明らかにされている。しかし、主流速度の大きさや向きが時間的に変動するような複雑な流れ場を有する波動場や振動流場における円柱の渦励振動特性および相互作用問題に対する把握は、一方向流中におけるそれに比べてまだ不十分である。

本研究は、柱状な海洋構造物の渦励振動特性を明らかにすることを目的として、一様振動流中における円柱の渦励振動量特性におよぼす減衰定数の影響を室内模型実験により調べたものである。

2. 実験装置および方法

実験は、水平方向に正弦振動する振動台上に固定された鉄枠製両面ガラス張り水槽(振動流発生装置)を用いて行った。実験装置の概略を図-1に示す。支柱と引っ張りバネを用いて水槽内の水槽横断方向に水平設置されたアクリル製の試験円柱(外径 $D=3\text{cm}$ 、長さ $=48\text{cm}$)は、水槽の振動方向と直角な方向となる揚力方向(=鉛直方向)にのみ振動可能である。水槽の振動に伴って生じる自由水表面の動揺を防ぎ一様振動流としての流れ場を得るために、水槽上面にはアクリル板製の上蓋

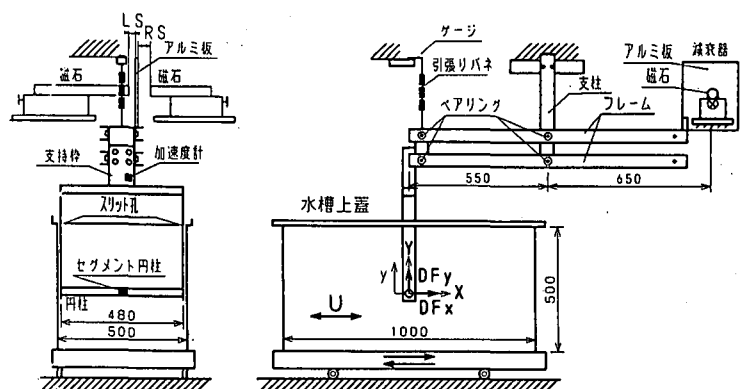


図-1 実験装置の概略

* 正会員 防衛大学校 土木工学教室
 ** 学生会員 防衛大学校 理工学研究所

が自由水面と接する状態で設けられている。試験円柱は、この上蓋内の両サイドに設けた幅 2cm のスリット孔を通る 2 枚の端板（長さ=40cm、幅=5cm、厚さ 1.5mm）を用いて支持枠に取り付けられている。

円柱の振動量を計測するために、引っ張りバネの伸張量に比例する力を歪みゲージを用いて電圧変換した。円柱の静止時からの鉛直方向（Y 方向）への変位量を y とする。円柱の振動加速度を計測するために円柱と一体に振動する支持枠に加速度計を取り付けている。試験円柱に作用する流体力を計測するために、小型 2 分力計に片持ち梁形式で接続されたセグメント円柱（外径=3cm、長さ=3cm）が試験円柱内に取り付けられている⁹。

円柱-バネ系の減衰定数（構造減衰定数） ζ を調整するためにフレームの他端にはアルミ板と棒磁石より構成される減衰器を取り付けている。アルミ板と棒磁石の間隔 LS、RS を変えることにより試験円柱の構造減衰定数 ζ の調整が可能である。また、より高い構造減衰定数 ζ を得るためにアルミ板に取り付けた薄いバルサ板（厚さ 1mm）を水液または洗剤液に挿入した。バルサ板と水液または洗剤液との接触面積を変えることにより ζ の調整が可能である。

実験に先立ち空中と静水中で減衰自由振動実験を行い、試験円柱の空中および静水中における固有振動数 f_{0a} 、 f_{0w} と減衰定数 ζ_{0a} 、 ζ_{0w} をそれぞれ求めた。空気による流体減衰力は小さいので、空中における減衰定数 ζ_{0a} は構造減衰定数 ζ とほぼ等しい。円柱に載せた荷重と引っ張りバネの伸張量との関係よりバネ係数 K を求めた。このバネ係数と水中での固有振動数 f_{0w} より、水の付加質量をも含む試験円柱の単位スパン長さ当たりの質量（換算単位長質量）を算定した。試験円柱の質量比 $m_{sw}/(\rho D^3)$ （ ρ ：水の密度）は 11.0 である。

本実験で行った実験条件を表-1 に示す。

CASE A1～CASE A7 は、(1)式で示される KC 数を 10 に固定し、振動流周波数 f_d を変化させ渦励振動量の周波数比 f_d/f_{0w} に対する変化特性を後の(15)式で説明する質量減衰パラメータ値（ K_{sw} 値）をパラメータとして調べたものである。

CASE B1～CASE B5 は、渦励振動量の周波数比 f_d/f_{0w} に対する変化特性を質量減衰を KC=6、8、12、14、17 の各場合において調べたものである。質量減衰パラメータ値（ K_{sw} 値）は $K_{sw}=1.38$ と 8.56 の二通りとした。

CASE C1～CASE C6 は、作用揚力の第 2 次と第 3 次の周波数成分すなわち振動流周波数 f_d の 2 倍、3 倍の周波数をもつ揚力成分と円柱が共振している場合における渦励振動量の KC 数に対する変化特性を K_{sw} 値をパラメータとして調べたものである。

CASE	磁石間隔(mm)		液体	KC数	f_d/f_{0w}	固有振動数(Hz)		減衰定数		質量減衰パラメータ	
	LS	RS				f_{0a}	f_{0w}	ζ_{0a}	ζ_{0w}	K_{sw}	K_{sw}
A1	∞	∞		10.0	0.35～0.70	0.909	0.861	0.004	0.014	0.55	1.93
A2	5.0	0.5		10.2	0.35～0.70	0.909	0.861	0.030	0.040	4.14	5.52
A3	3.0	0.5		10.2	0.35～0.70	0.909	0.861	0.040	0.050	5.52	6.90
A4	0.5	0.5		10.2	0.35～0.70	0.909	0.861	0.056	0.066	7.73	9.11
A5	0.5	0.5	1 水	10.2	0.35～0.70	0.870	0.813	0.078	0.088	10.76	12.15
A6	0.5	0.5	2 水	10.2	0.35～0.70	0.833	0.725	0.086	0.096	11.87	13.26
A7	0.5	0.5	2 洗剤	10.3	0.35～0.70	0.833	0.602	0.240	0.250	33.12	34.52
B1-a	∞	∞		5.9	0.35～0.70	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38
B1-b	0.5	0.5		5.8	0.35～0.70	0.910	0.866	0.056	0.062	7.73	8.56
B2-a	∞	∞		7.8	0.35～0.70	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38
B2-b	0.5	0.5		7.8	0.35～0.70	0.910	0.866	0.056	0.062	7.73	8.56
B3-a	∞	∞		11.6	0.35～0.70	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38
B3-b	0.5	0.5		11.5	0.35～0.70	0.910	0.866	0.056	0.062	7.73	8.56
B4-a	∞	∞		14.2	0.30～0.70	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38
B4-b	0.5	0.5		14.1	0.35～0.70	0.910	0.866	0.056	0.062	7.73	8.56
B5-a	∞	∞		17.4	0.30～0.70	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38
B5-b	0.5	0.5		17.4	0.35～0.70	0.910	0.866	0.056	0.062	7.73	8.56
C1-a	∞	∞		4～20	0.51	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38
C1-b	∞	∞		4～20	0.33	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38
C2-a	5.0	2.0		5,10,15,20	0.51	0.910	0.866	0.011	0.017	1.52	2.35
C2-b	5.0	2.0		5,10,15,20	0.33	0.910	0.866	0.011	0.017	1.52	2.35
C3-a	15.0	10.0		5,10,15,20	0.51	0.910	0.866	0.028	0.034	3.86	4.70
C3-b	15.0	10.0		5,10,15,20	0.33	0.910	0.866	0.028	0.034	3.86	4.70
C4-a	2.0	2.0		4～20	0.51	0.910	0.866	0.040	0.046	5.52	6.35
C4-b	2.0	2.0		4～20	0.33	0.910	0.866	0.040	0.046	5.52	6.35
C5-a	2.0	0.5		4～20	0.51	0.910	0.866	0.046	0.052	6.35	7.18
C5-b	2.0	0.5		4～20	0.33	0.910	0.866	0.046	0.052	6.35	7.18
C6-a	0.5	0.5		4～20	0.51	0.910	0.866	0.057	0.063	7.87	8.70
C6-b	0.5	0.5		4～20	0.33	0.910	0.866	0.057	0.063	7.87	8.70

3. 振動方程式

Y 方向のみに振動する試験円柱の振動モデル、及び座標系を図-2 に示す。

空中における試験円柱の減衰自由振動方程式は、(2)式で表される。

$$m_{ea} \ddot{y} + C_a \dot{y} + K y = 0 \quad \text{---(2)}$$

式中、 y は円柱の Y 方向振動量である。 $\dot{y}$ 及び $\ddot{y}$ は振動速度 dy/dt と振動加速度 d^2y/dt^2 である。 m_a, C_a は空中における試験円柱の単位長さあたりの換算質量(端板や支柱枠等の質量影響も含む)及び減衰係数である。 K は換算バネ係数である。(2)式は通常(3)式のように表現される。

$$\ddot{y} + 2\zeta_{ta} \cdot 2\pi f_{na} \cdot \dot{y} + (2\pi \cdot f_{na})^2 \cdot y = 0 \quad \text{---(3)}$$

式中、 f_{na}, h_a は、次式で示される円柱の空中における固有振動数及び減衰定数である。

$$f_{na} = (K/m_{ea})^{1/2} / 2\pi \quad \text{---(4)}$$

$$\zeta_{ta} = C_a / (2 \cdot 2\pi f_{na} \cdot m_{ea}) \quad \text{---(5)}$$

静水中における円柱の減衰自由振動方程式は(6)式で示される。

$$m_{ea} \cdot \ddot{y} + C_a \cdot \dot{y} + K \cdot y = -(C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4 \cdot \ddot{y} + C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}| \cdot \dot{y}) \quad \text{---(6)}$$

右辺は、静水中で振動する円柱に作用する流体力をモリソン式を用いて表したものである。その第1項は、円柱の振動加速度 $\ddot{y} = d^2y/dt^2$ に比例する慣性力項である。第2項は、円柱の振動速度 $\dot{y} = dy/dt$ の2乗に比例する抗力項である。式中 C_M, C_D は、抗力係数及び質量係数である。(6)式を次式のように変形する。

$$(m_{ea} + C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4) \cdot \ddot{y} + (C_a + C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) \cdot \dot{y} + K \cdot y = 0 \quad \text{---(7)}$$

したがって、 $C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4$ は円柱単位長さあたりの水中付加質量を示す。 $(C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) \cdot \dot{y}$ は、流体減衰力を示す。(7)式を、(8)式のように変形する。

$$\ddot{y} + 2\zeta_{tw} \cdot 2\pi f_{nw} \cdot \dot{y} + (2\pi f_{nw})^2 \cdot y = 0 \quad \text{---(8)}$$

式中、 f_{nw}, ζ_{tw} は、次式で示される円柱の静水中における固有振動数及び減衰定数である。

$$f_{nw} = (K/m_{ew})^{1/2} / 2\pi \quad \text{---(9)}$$

$$\zeta_{tw} = (C_a + C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) / (2 \cdot 2\pi f_{nw} \cdot m_{ew}) \quad \text{---(10)}$$

ここで、 m_{ew}, C_w は水中における試験円柱の換算単位長さあたりの質量と衰定数である。 m_{ew} は次式で示される。

$$m_{ew} = m_{ea} + C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4 \quad \text{---(11)}$$

円柱の単位長さあたりに作用する Y 方向の流体力 (=揚力) を DF_y とすると振動方程式は次式となる。

$$\ddot{y} + 2\zeta_{tw} \cdot 2\pi f_{nw} \cdot \dot{y} + (2\pi f_{nw})^2 \cdot y = DF_y / m_{ew} \quad \text{---(12)}$$

DF_y を次式の揚力式で評価する。

$$DF_y = 1/2 \cdot C_L \cdot \rho \cdot D \cdot U_m^2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t) \quad \text{---(13)}$$

ここに、 C_L は揚力係数、 ρ は流体密度、 D は円柱径、 U_m は振動流の最大主流速度、 f_i は揚力周波数である。(13)式を(12)に代入し、かつ、(12)式中の m_{ew} 及び ζ_{tw} は定数であると仮定すると(12)式は線形な振動方程式となり、次式の解が得られる。

$$y/D = \{ [1/2 \cdot C_L \cdot \rho \cdot D \cdot U_m^2 / (2\pi f_{nw})] / [1 - (f_i/f_a)^2]^2 + (2\zeta_{tw} \cdot f_i/f_a)^2 \}^{1/2} \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t + \phi) \quad \text{---(14)}$$

ここに、 ϕ は応答振動量 y と作用揚力 DF_y の位相差である。

作用揚力の周波数 f_i と円柱の水中固有振動数 f_{nw} が一致する共振時では、応答振動 y の振動片振幅 Y_h は次式で表される。

$$Y_h/D = C_L \cdot (KC/(f_i/f_a))^2 / \{ 4\pi (2m_{ew}(2\pi \cdot \zeta_{tw})) / (\rho \cdot D^2) \} = C_L \cdot (KC/(f_i/f_a))^2 / (4\pi \cdot K_{sw}) \quad \text{---(15)}$$

式中の $K_{sw} = (2m_{ew}(2\pi \cdot \zeta_{tw})) / (\rho \cdot D^2)$ は、質量減衰パラメータ値または Scruton 数と呼ばれている無次元数であり、渦励振動量を規定する重要なパラメータである。 f_i/f_a は KC 数の関数であり、 KC 数の増加に伴い階段状に 1, 2, 3 と増加する。

4. 実験結果および考察

ゼロアップクロス法を用いて、円柱渦励振動量 y の振動振幅と振動周波数を評価した。各実験の時系列内で得られた片振幅値 (= 振幅/2) の最大値を Y_{max} 、最小値を Y_{min} 、ならびに各片振幅値の標準偏差 Y_{VA} とする。各振動周波数の平均値を f_f とする。

4.1 渦励振動量の周波数比 f_d/f_{nw} に対する変化特性

$KC=6, 10, 17$ の場合における、渦励振動振幅の最大値と最小値 Y_{max}, Y_{min} 、振動振幅の標準偏差 Y_{VA} 、ならびに振動周波数 f_f の周波数比 f_d/f_{nw} に対する変化特性を K_{sw} 値をパラメータとして図-3に示す。 $KC=6$ と 10 の場合には、振動流周波数 f_d の2倍なる周波数をもつ揚力成分が卓越するために、 f_d/f_{nw} = 約 1/2 で共振が生じ振動振幅は大きくなっている。 $KC=17$ の場合には、 f_d の2倍と3倍なる周波数をもつ揚力成分がそれぞれ卓越するた

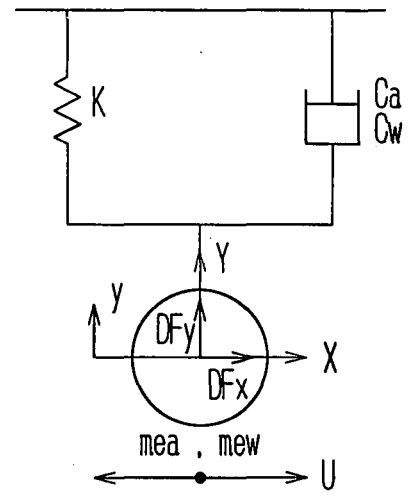


図-2 振動モデル及び座標系

めに、 f_d/f_{0w} ≈ 1/2 および f_d/f_{0w} ≈ 1/3 で共振が生じ振動振幅は大きくなっている。正確には共振点は $f_d/f_{0w}=1/2$ または $1/3$ より若干大きな値で生じている。この原因としては、渦励振動時における円柱の水中付加質量は、円柱が静水中で自由振動している場合の水中付加質量より減少するために、渦励振動時の円柱の固有振動数は静水中における円柱の固有振動数 f_{0w} より増加するためと考えられる。また、 K_{sw} 値が大きくなると(減衰定数の増加)、渦励振動振幅は小さくなっている。この付加質量の減少は、一方向流場や波動場における円柱の渦励振動時においても生じることが報告されている^{3),4)}。

$KC=10$ で $K_{sw}=1.93$ の場合には、 Y_{0st}/D は $f_d/f_{0w}=0.507$ の共振点で第1のピークを $f_d/f_{0w}=0.55$ 近傍で第2のピークを示している。前者は作用揚力の卓越周波数成分に対する共振現象である。後者は、円柱振動と流れとの相互作用により、後流渦の掃き出し周波数が円柱の固有振動数 f_{0w} の近傍値に固定化された生じる一種の共振現象と考えられる。これは、一方向流中における円柱の渦励振動において生じる Locking-in 現象¹⁾に類する非線形な振動応答特性であり、共振領域の拡大という点において工学的にも十分に考慮する必要がある。これと同様な振動現象が波動場における直円柱の渦励振動時においても生じることが報告されている⁴⁾。一方、 $KC=10$ で $K_{sw}=9.11$ の場合には、 Y_{0st}/D は $f_d/f_{0w}=0.507$ の共振点でピーク値を示しているが第2のピーク値は生じていない。

$KC=10$ の場合における、渦励振動量 y の時間記録例の周波数比 f_d/f_{0w} に対する変化特性を、 K_{sw} をパラメーターとして図-4に示す。図中の左側図は $K_{sw}=1.93$ 、右側図は $K_{sw}=9.11$ の場合である。 $K_{sw}=1.93$ の場合、 $f_d/f_{0w}=0.507$ の共振点では非常に規則的な振動が生じているが、共振点から外れた f_d/f_{0w} では y の振動振幅は時間的に変動している。第2の振動ピーク点近傍の $f_d/f_{0w}=0.57$ の場合には非常に規則的な振幅変調が生じている。一方、 $K_{sw}=1.93$ の場合は、全ての周波数比 f_d/f_{0w} において規則的な振動が生じている。従って、図-

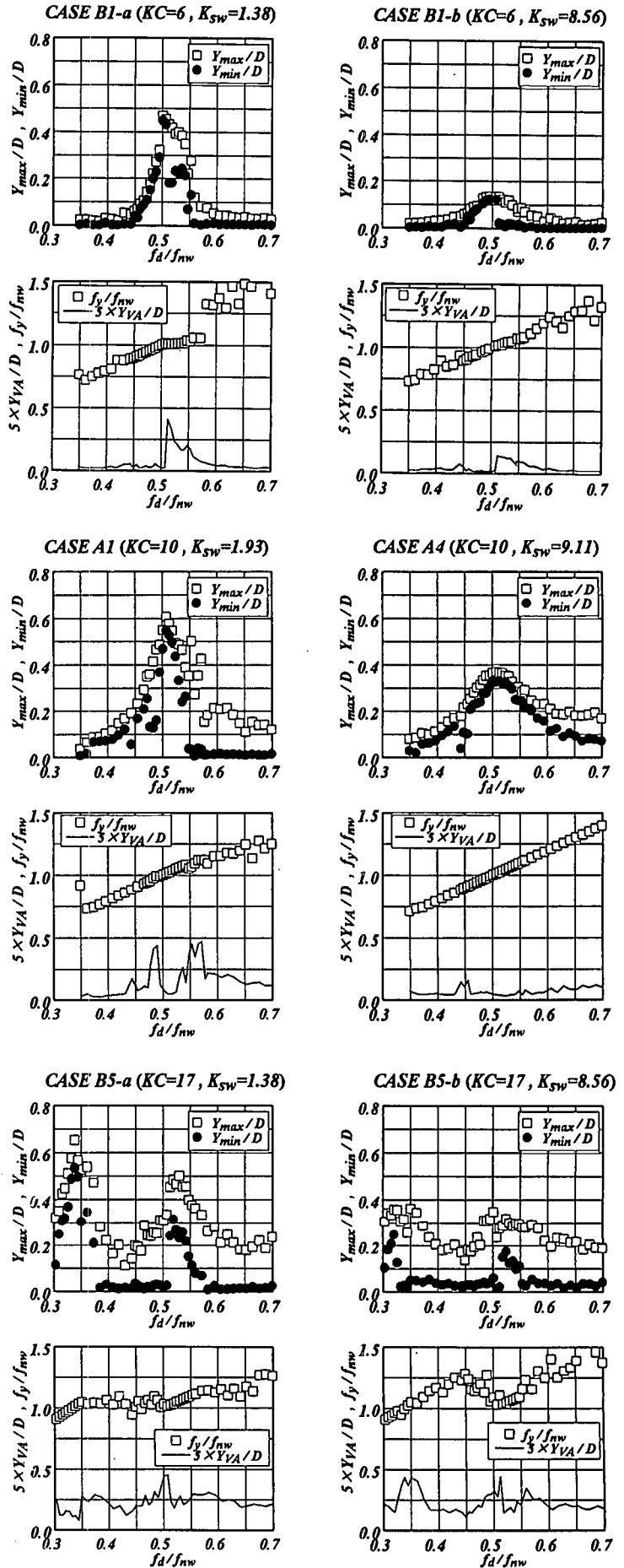


図-3 渦励振動の周波数 f_d/f_{0w} 比に対する変化特性 ($KC=10$)

3 に示す $KC=10$ の場合の振動振幅の標準偏差 Y_{VA} は、 $K_{sw}=1.93$ の場合が $K_{sw}=9.11$ の場合より大きくなっている。また、どの KC 数の場合でも共振点において Y_{VA} は小さくなっている。つまり、共振点においては非常に規則的な振動が生じていることが分かる。

4.2 渦励振動量の KC 数に対する変化特性

振動流周波数 f_d の 2 倍または 3 倍なる周波数をもつ揚力成分と円柱が共振している場合 ($f_d/f_{nw}=0.51$ または $f_d/f_{nw}=0.33$) の振動量 Y_{max} および Y_{min} の KC 数に対する変化特性を K_{sw} をパラメーターとして図-5 に示す。 $f_d/f_{nw}=0.51$ の場合、 f_d の 2 倍なる周波数をもつ揚力成分揚力の発生は $KC=5$ あたりから始まる。従って、渦励振動は $KC=5$ 前後から始まり $KC=10 \sim 11$ 付近で最大値をとりその後は KC 数の増加に伴い減少している。 $K_{sw}=1.38$ の場合には、 $KC=4$ から渦励振動は始まり、 $5 < KC < 7$ の範囲で急激に増加している。

一方、 $f_d/f_{nw}=0.33$ の場合は、 f_d の 3 倍なる周波数をもつ揚力成分の発生は $KC=15$ あたりから始まる。従って、渦励振動は $KC=15$ 前後から始まり $KC=17$ 前後で最大値を示している。 $K_{sw}=1.38$ 場合には、 $KC=13$ あたりから渦励振動は始まり、 $KC=15$ 前後で最大値を示している。

4.3 渦励振動量の K_{sw} 値に対する変化特性

振動流周波数 f_d の 2 倍または 3 倍なる周波数をもつ揚力成分と円柱が共振している場合 ($f_d/f_{nw}=0.51$ または $f_d/f_{nw}=0.33$) の振動量 Y_{max} の K_{sw} 値に対する変化特性を KC 数をパラメーターとして図-6 に示す。図中には、比較のために一方向流中における円柱の渦励振動量の最大値 Y_{max} を参考値として示している³⁾。空気流の場合には K_{sw} 値を、水流の場合には K_{sw} 値を用いた。縦軸値に用いた γ は Geometric factor²⁾ である。本試験円柱のように円柱が一体となって振動する振動モードの場合は $\gamma=1$ である。円柱の一端をピン支点として倒立振動する振動モードの場合は $\gamma=1.29$ である。

$f_d/f_{nw}=1/2$ においては以下のことが明らかである。

- 1) $KC=5$ の振動流の Y_{max}/D は、一方向流の場合より全般的に小さい。これは、 $KC=5$ の場合、揚力係数が非常に小さいためと考えられる。
- 2) $KC=15$ および 15 の振動流の Y_{max}/D は、 $K_{sw}<4$ では一方向流の場合とほぼ同じであるが、 $K_{sw}>4$ では一方向流の場合より大きくなっている。

$f_d/f_{nw}=1/3$ においては以下のことが明らかである。

- 1) $KC=16, 18, 20$ の振動流の Y_{max}/D は、 $K_{sw}<4$ では一方向流の場合とほぼ同じであるが、 $K_{sw}>4$ では一方向流の場合より大きくなっている。
- 2) $KC=20$ の振動流の Y_{max}/D は、一方向流の場合とほぼ同じである。

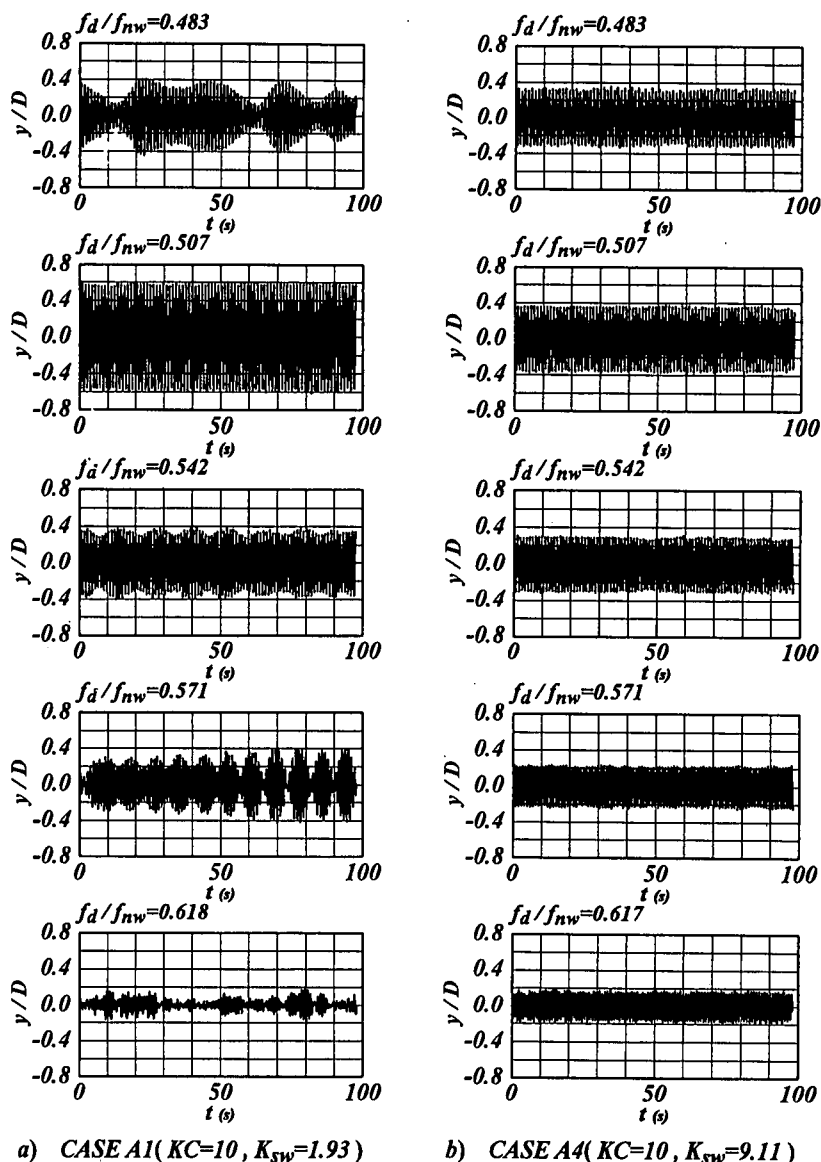


図-4 渦励振動量 y の記録例 ($KC=10$)

(15)式に従うと渦励振動量は K_{sw} 値の逆数に比例する。つまり、 KC 数が同じ場合、図中の実験値 Y_{max}/D はマイナス 1 の勾配をもつ直線上にプロットされる。しかし、円柱振動と流れとの相互作用による揚力や減衰定数の変化が生じる結果、実験値の Y_{max}/D にはそのような線形な関係は認められない。

5. おわりに

KC 数が小さい場合 ($KC < 20$) の振動流中における円柱の渦励振動特性を模型実験により調べた。a) KC 数が 4 以上になると渦励振動現象が生じることが明らかとなった。b) 振動流中における円柱の渦励振動量は、一方向流の場合と同様に K_{sw} 値に対して非線形な関係で規定されていること、および、 $K_{sw} < 4$ では一方向流の場合とほぼ同じであるが、 $K_{sw} > 4$ では一方向流の場合より大きくなっていることが明らかになった。

参考文献

- 1) 岡内 功、伊藤 学、宮田利雄：耐風工学、丸善、412p, 1977.
- 2) Brevins, R.D. : Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, 363P, 1977.
- 3) 林建二郎、田中克也、藤間功司、重村利幸：一様流中で渦励振動している円柱に作用する流体力に関する実験的研究、防衛大学校理工学研究報告、第 34 巻・第 2 号、pp.11-23、1997.
- 4) 林建二郎、檜垣 太、藤間功司、重村利幸：振動流場で渦励振動している円柱に作用する波力特性について、海岸工学論文集、第 42 巻、pp.836-840、1995.
- 5) Sarpkaya, T. : Fluid Forces on Oscillating Cylinders, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol.104, WW4, pp.275-290.
- 6) 林建二郎、J.R. Chaplin : 波動場における直円柱の渦励振動について、第 32 回海岸工学講演演会論文集、pp.633-637、1985.

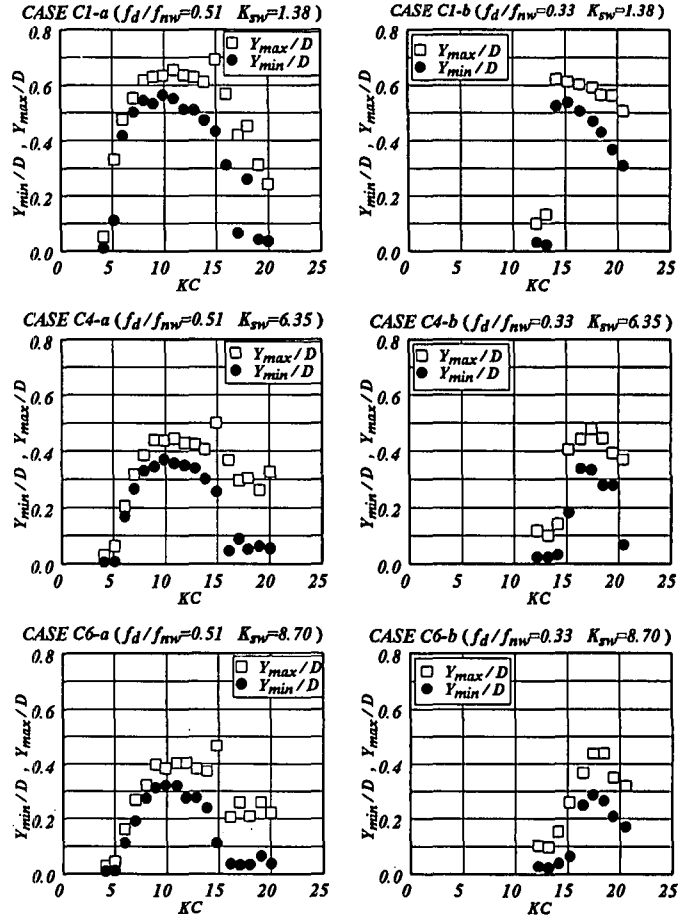


図-5 渦励振動量の KC 数に対する変化特性

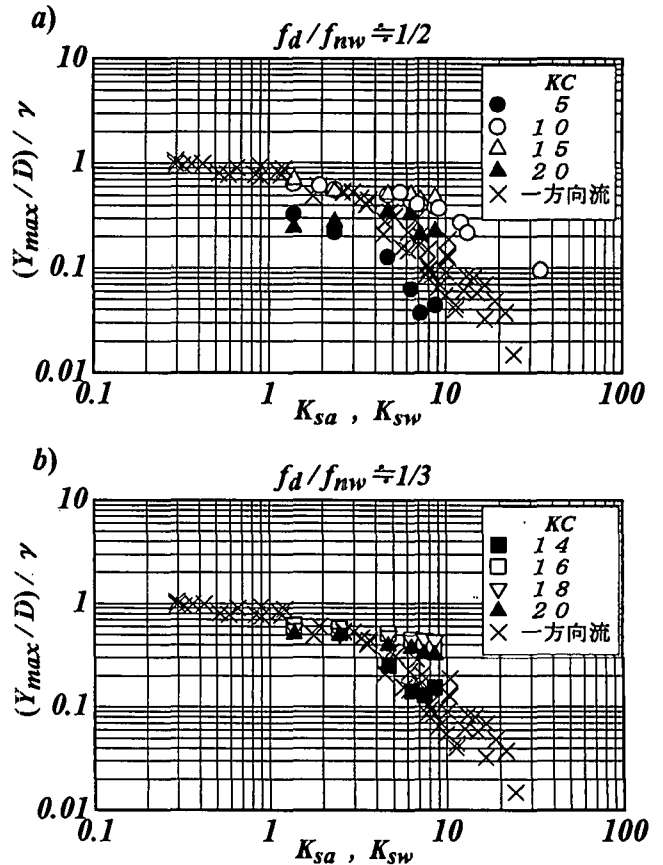


図-6 渦励振動量の Scruton 数 (K_{sa} , K_{sw}) に対する変化特性