

振動流中で渦励振動している円柱と流れとの 相互作用による作用波力の変化特性

林 建 二 郎*・田 中 克 也**・藤 間 功 司***・重 村 利 幸****

1. 緒 言

柱状な海洋構造物（例えば、石油掘削用ライザー管や水中トンネル）の設計においては渦励振動問題を十分に検討する必要がある。渦励振動量の算定には、振動強制外力となる構造物に作用する波力と減衰定数を的確に評価する必要がある。しかし、渦励振動時の構造物に作用する波力の大きさは、振動している構造物と流れとの相互作用が生じる結果、本構造物が静止している場合と異なる。従って、渦励振動量の評価を精度良く行うには、渦励振動時の波力特性を十分に把握する必要がある。

Vichery ら (1962), Griffin ら (1977) と林ら (1997 a) は、一様流中にバネ等を用いて弾性的に支持され渦励振動している円柱（自由振動法実験）に作用する揚力の評価を行った。その結果、揚力係数は、流れと直角な方向（揚力方向）の渦励振動の片振幅 Y が円柱径 D の 0.5 倍程度までは Y の増加に伴い増加するが、それ以上に Y が増加すると揚力係数は減少することが明らかにされた。

Sarpkaya (1978) は、一様流中に置かれた円柱を流れと直角な方向に強制的に加振させる実験（加振法実験）を行い、加振円柱に作用する揚力および抗力の換算流速 $V_r (= U/(f_c \cdot D)$, f_c : 加振周波数) に対する変化特性を振動振幅比 Y_c/D (Y_c : 円柱の加振片振幅) をパラメータとして調べた。その結果、a) 円柱の振動変位 y と同位相の揚力成分は $V_r=5$ 近傍で急激に変化すること、b) 円柱の振動速度 dy/dt (t : 時間) と同位相の揚力成分は、 $V_r=5$ 近傍で振動振幅 Y_c/D により大きく変化すること、ならびに c) Y_c/D の増加に伴い抗力は増加することが明らかとなった。

林ら (1995) は、波動場や振動流場で渦励振動している円柱に作用する波力の特性を調べ、渦励振動円柱に作用する波力が、同円柱静止時より増加する領域は、周波数比 f_w/f_{nw} , f_d/f_{nw} (f_w : 作用波周波数, f_d : 振動流周波数) と KC 数で規定されていることを明らかにした。

本研究は、渦励振動時の海洋構造物に作用する波力の変化特性をさらに詳しく調べることを目的として、KC 数が 20 以下の振動流中で渦励振動している円柱に作用する波力の変化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 $D=3$ cm, 長さ $=48$ cm）は、振動流の方向と直角な揚力方向（＝鉛直方向）にのみ自由振動する。水槽の振動により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を自由水面と接する状態で設けている。試験円柱は、この上蓋内の両サイドに設けた幅 2 cm のスリット孔を通る 2 枚の端板（長さ $=40$ cm, 幅 $=5$ cm, 厚さ 1.5 mm）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への振動変位量を y とする。円柱の振動加速度 (d^2y/dt^2) 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た。円柱に作

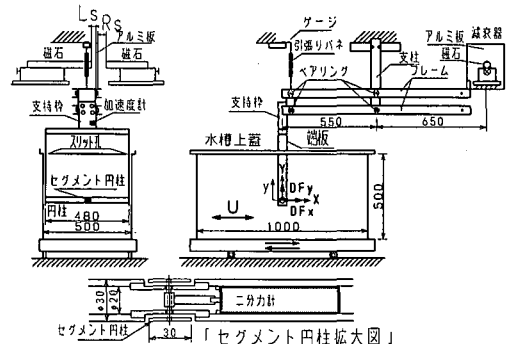


図-1 実験装置の概略

* 正 会 員 Ph. D. 防衛大学校助教

** 学生会員 防衛大学校理工学研究所

*** 正 会 員 工 博 防衛大学校助教

**** 正 会 員 Dr. E. 防衛大学校教授

用する流体力の直接計測を行うために、円柱内に組み込んだ2分力計に取り付けられたセグメント円柱（外径＝3 cm、長さ＝3 cm）の単位長さ当たり作用する流れ方向（X方向）および揚力方向（Y方向）の流体力 DF_x 、 DF_y を計測した。

円柱一バネ系の構造減衰定数 ζ_s 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 L_s 、 R_s を変えることにより試験円柱の構造減衰定数 ζ_s の調整が可能である。また、より大きな値の構造減衰定数 ζ_s を得るために減衰器のアルミ板に取り付けた薄いバルサ板（厚さ1 mm）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_s 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_{na} 、 f_{nw} と減衰定数 ζ_{ia} 、 ζ_{iw} 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_{ia} は構造減衰定数 ζ_s 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_{nw} より、水の付加質量も含む試験円柱の単位スパン長さ当たりの換算質量（換算単位長質量）を算定した。試験円柱の換算質量比 $m_{ew}/(\rho \cdot D^2)$ （ ρ ：水の密度）は11.0である（Case A1～A4とCase C1～C7の場合）。本実験で行った実験条件を表-1に示す。

CASE A1～CASE A7は、KC数（ $=U_m/(f_a \cdot D) = 2\pi A/D$ 、 U_m ：振動流主流の最大速度、 A は水槽振動の片幅振幅）を約10に固定し、振動流周波数 f_a を変化させ渦励振動量の周波数比 f_a/f_{nw} に対する変化特性を K_{sw} 値（ $=2m_{ew}(2\pi \cdot \zeta_{iw})/(\rho \cdot D^2)$ ）をパラメーターとして調べたものである。 K_{sw} 値は、質量減衰パラメーター値または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ーである（Blevins, 1977；林ら, 1997b）。

CASE C1～CASE C7は、作用揚力の第2次の周波数成分すなわち振動流周波数 f_a の2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 y のKC数に対する変化特性を K_{sw} 値をパラメーターとして調べたものである。

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

表-1 実験条件

CASE	磁石間隔(mm)		短冊数	液体	KC数	f_a/f_{nw}		固有振動数(Hz)		減衰定数		質量減衰パラメーター	
	L_s	R_s				f_{aw}	f_{nw}	f_{aw}	f_{nw}	ζ_{ia}	ζ_{iw}	K_{sa}	K_{sw}
A1	∞	∞			10.0	0.30～0.70	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	0.37～0.74		0.813		0.088		13.60	
A6	0.5	0.5	2	水	10.2	0.41～0.81		0.725		0.096		18.67	
A7	0.5	0.5	2	洗剤	10.3	0.33～0.82		0.602		0.290		81.78	
A8	0.5	0.5	1	洗剤	10.0	0.32～0.76		0.714		0.150		30.07	
A9	静止円柱				10.2	$f_a=0.300\sim0.600$ Hz							
C1	∞	∞			4～20	0.51	0.910	0.866	0.004	0.010	0.55	1.38	
C2	15.0	10.0			5, 10, 15, 20	0.51	0.910	0.866	0.011	0.017	1.52	2.35	
C3	5.0	2.0			5, 10, 15, 20	0.51	0.910	0.866	0.028	0.034	3.86	4.70	
C4	2.0	2.0			4～20	0.51	0.910	0.866	0.040	0.046	5.52	6.35	
C5	2.0	0.5			4～20	0.51	0.910	0.866	0.046	0.052	6.35	7.18	
C6	0.5	0.5			4～20	0.51	0.910	0.866	0.057	0.063	7.87	8.70	
C7	10.0	10.0			4～20	0.51	0.910	0.866	0.016	0.021	2.07	2.90	
C8	静止円柱				4～20	$f_a=0.435$ Hz							

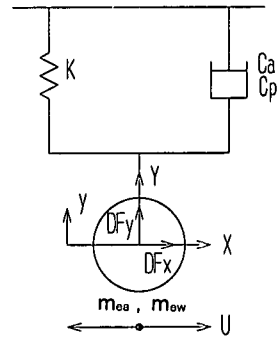


図-2 振動モデル

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、(1)式で表される。

$$m_{ea} \cdot \ddot{y} + C_a \cdot \dot{y} + K \cdot y = 0 \quad (1)$$

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_{ea} と C_a は空中における試験円柱の単位長さ当たりの換算質量（端板や支柱棒等の質量影響も含む）と減衰係数である。 K は換算バネ係数である。(1)式は通常(2)式のように表現される。

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

式中、 f_{na} 、 ζ_{ia} は、(3)式、(4)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。

$$f_{na} = (K/m_{ea})^{1/2} / 2\pi \quad (3)$$

$$\zeta_{ia} = C_a / (2 \cdot 2\pi f_{na} \cdot m_{ea}) \quad (4)$$

静水中におけ減衰自由振動方程式は(5)式で示される。

$$m_{ea} \cdot \ddot{y} + (C_a + C_p) \cdot \dot{y} + K \cdot y = -(C_m \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4 \cdot \ddot{y} + C_p \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}| \dot{y}) \quad (5)$$

左辺の C_D は端板部における減衰係数である。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_D , C_M は、円柱抗力係数及び質量係数である。

(5) 式を (6) 式のように変形する。

$$(m_{ea} + C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4) \cdot \ddot{y} + (C_a + C_D + C_p \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) \dot{y} + K \cdot y = 0 \cdots (6)$$

従って、 $C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4$ および $(C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) \dot{y}$ は、円柱単位長さあたりの水中付加質量と流体減衰力を示す。

(6) 式を、(7) 式のように変形する

$$\ddot{y} + 2\zeta_{tw} \cdot 2\pi f_{nw} \cdot \dot{y} + (2\pi f_{nw})^2 \cdot y = 0 \cdots (7)$$

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。

$$f_{nw} = (K/m_{ew})^{1/2} / 2\pi \cdots (8)$$

$$\zeta_{tw} = (C_a + C_D + C_p \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) / (2 \cdot 2\pi f_{nw} \cdot m_{ew}) \cdots (9)$$

ここで、 m_{ew} は水中付加質量をも含む試験円柱の単位長さあたりの換算質量であり (10) 式で示される。

$$m_{ew} = m_{ea} + C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4 \cdots (10)$$

渦励振動時の円柱の単位長さあたりに作用するY方向の流体力を DF_y とすると、(11) 式の振動方程式が得られる。

$$m_{ea} \cdot \ddot{y} + (C_a + C_p) \cdot \dot{y} + K \cdot y = DF_y \cdots (11)$$

DF_y を (12) 式のように三角関数の和で表せるとする。

$$DF_y = DF_{ys} \cdot \sin(2\pi f_y \cdot t) + DF_{yc} \cdot \cos(2\pi f_y \cdot t) \cdots (12)$$

式中の DF_{ys} は、 DF_y の円柱の振動変位 y ($y = Y \sin(2\pi f_y \cdot t)$, Y : 円柱振動の片振幅, f_y : 円柱の振動周波数) との同位相成分である。 DF_{yc} は振動速度 $\dot{y}$ との同位相成分である。フーリエ解析を用いると、 DF_{ys} と DF_{yc} は (13) 式、(14) 式でそれぞれ表させる。

$$DF_{ys} = (2/T_m) \int_0^{T_m} DF_y \cdot \sin(2\pi f_y \cdot t) \cdots (13)$$

$$DF_{yc} = (2/T_m) \int_0^{T_m} DF_y \cdot \cos(2\pi f_y \cdot t) \cdots (14)$$

式中の T_m はサンプリング時間である。(13) 式～(15) 式を (11) 式に代入すると (15) 式が得られる。

$$\begin{aligned} -m_{ea} \cdot Y(2\pi f_y)^2 \sin(2\pi f_y \cdot t) + (C_a + C_p) \cdot Y(2\pi f_y) \cdot \cos(2\pi f_y \cdot t) + K \cdot Y \sin(2\pi f_y \cdot t) \\ = DF_{ys} \cdot \sin(2\pi f_y \cdot t) + DF_{yc} \cdot \cos(2\pi f_y \cdot t) \cdots (15) \end{aligned}$$

(15) 式中の $\sin$ 項および $\cos$ 項の係数をまとめると (16) 式、(17) 式が得られる。

$$Y = (DF_{ys}/K) / \{1 - (f_y/f_{na})^2\} \cdots (16)$$

$$Y = DF_{yc} / \{(C_a + C_p)(2\pi f_y)\} \cdots (17)$$

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 $Y_{\max}$, 振動周波数の平均値を f_y とする。

試験円柱は流れと直角な揚力方向にのみ渦励振動している。従って、2分力計で計測されたセグメント円柱部の単位長さあたりに作用する揚力方向の力成分 DF_y には、揚力方向の流体力 DF_{ya} とセグメント円柱部に作用する質量力 DF_{ia} (= セグメント円柱部の質量 $\times$ 円柱の振動加速度) が含まれている。 DF_y よりこの DF_{ia} を差し引いた DF_{ya} ($= DF_y - DF_{ia}$) を正味の揚力方向の流体力とする。質量力 DF_{ia} は、セグメント円柱部の単位長さあたりの質量に振動加速度 d^2y/dt^2 を乗じて求めた。セグメント円柱部の質量は、空中における減衰自由振動実験において得られた DF_y と振動加速度 d^2y/dt^2 の関係 ($DF_y = \text{セグメント円柱部等の質量} \times \text{円柱の振動加速度}$) より求めた。

DF_{ya} の特性をより詳しく調べるために、円柱の振動変位 y と揚力 DF_{ya} のフーリエ解析を行い、 DF_{ya} の a) 振動変位との同位相成分 DF_{ys} , b) 振動速度との同位相成分 DF_{yc} , ならびに c) 振動流周波数 f_d の2倍なる周波数成分 ($= DF_{ya}$ の第2次周波数成分) $F_{ya}(2)$ を求め、下記の揚力係数をそれぞれ算定した。

$$C_s = DF_{ys} / (1/2 \cdot \rho \cdot D \cdot U_m^2) \cdots (18)$$

$$C_c = DF_{yc} / (1/2 \cdot \rho \cdot D \cdot U_m^2) \cdots (19)$$

$$C_{LT} = F_{ya}(2) / (1/2 \cdot \rho \cdot D \cdot U_m^2) = (C_s^2 + C_c^2)^{1/2} \cdots (20)$$

KC=10 の場合 (Case A 1～A 8) における、円柱の振動振幅 $Y_{\max}/D$ と揚力係数 C_{LT} , C_c , C_s の周波数比 f_d/f_{nw} に対する変化特性を K_{sw} 値をパラメーターとして図-3 に示す。KC=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 (= 第2次周波数成分) が卓越するために、 $f_d/f_{nw} = \text{約 } 1/2$ で共振が生じている。振動振幅は K_{sw} 値の増加に伴い減少している。

正確な共振点は、 $f_d/f_{nw} = 1/2$ ではなく $f_d/f_{nw} = 0.507$ 付近で生じている。この原因としては、渦励振動時の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_{nw} より増加するためと考えられる (林ら, 1997b)。

C_{LT} は、共振点前の $f_d/f_{nw} = 0.46$ 付近で最大値を示し、 $f_d/f_{nw} = 0.53$ 付近で最小値を示している。図中には比較のために円柱静止時の C_{LT} を実線で記入している。渦励振動時の C_{LT} は円柱静止時よりも、共振点の手前の f_d/f_{nw} では大きくなり、共振点を過ぎた f_d/f_{nw} では小さく

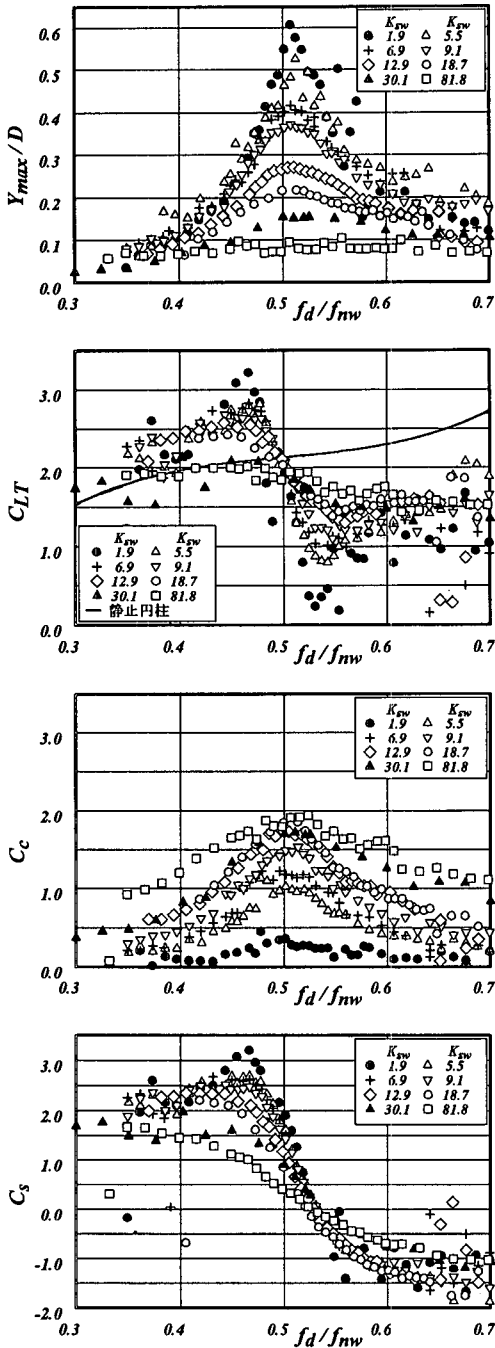


図-3 渦励振動の周波数比に対する変化特性 (KC=10 の場合)

なっている。

C_c は共振点で最大値を示し、その大きさは K_{sw} の増加に伴う振動振幅の減少に伴い減少している。 C_s は、 $f_d/f_{nw} < 0.53$ の領域では正の値を、 $f_d/f_{nw} > 0.53$ の領域では負の値を示している。その絶対値の大きさは、 K_{sw} の増

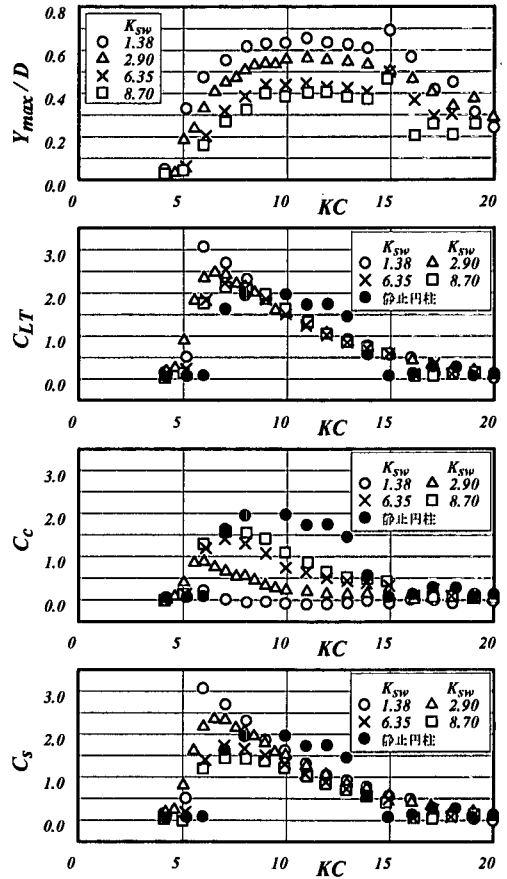
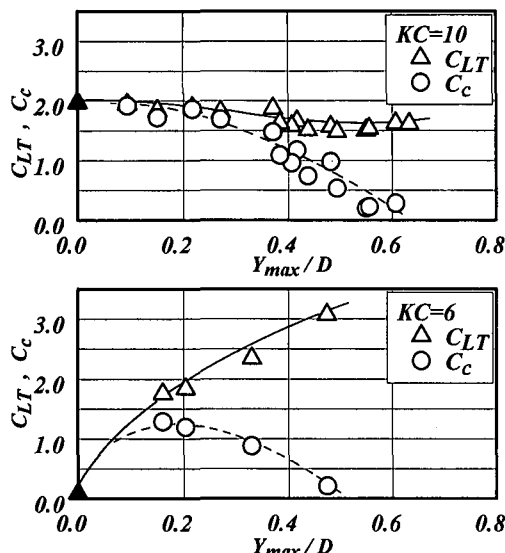


図-4 渦励振動の KC 数に対する変化

加に伴い減少している。 $f_d/f_{nw} < 0.53$ の領域での C_s の絶対値は、 $f_d/f_{nw} > 0.53$ の領域でのそれよりも大となっている。 C_s の正負の反転は、共振点 ($f_d/f_{nw} = 0.507$) ではなく $f_d/f_{nw} = 0.530$ 付近で生じている。この場合の f_d 値 ($= 0.53 f_{nw} = 0.456 \text{ Hz}$) は、試験円柱の空中における固有振動数 f_{na} ($= 0.909 \text{ Hz}$) の $1/2$ 倍値 ($= 0.454 \text{ Hz}$) とほぼ一致している。このことは、本渦励振動モデルにおける (16) 式の妥当性を示している。

共振時 ($f_d/f_{nw} = 0.507$) の Y_{max}/D と揚力係数 C_{LT} 、 C_c 、 C_s の KC 数に対する変化特性を K_{sw} 値をパラメーターとして図-4 に示す。 C_{LT} 、 C_c 、 C_s の図中には比較のために円柱静止時の C_{LT} を記入している。

$5 < KC$ の領域で渦励振動が生じている。渦励振動時の C_{LT} は、円柱静止時の C_{LT} より $5 < KC < 8$ の領域で増加し、 $8 < KC < 15$ の領域で減少している。 $5 < KC < 8$ の領域では K_{sw} 値の影響が認められる。 C_s も C_{LT} と同様な KC 数に対する変化特性を示しているが、その大きさは K_{sw} 値の増加に伴い減少している。これら両係数は、 $5 < KC < 8$ の領域で最大値を示している。一方、 C_c に対する K_{sw}

図-5 揚力係数の $Y_{\max}/D$ に対する変化特性

値の影響はより顕著であり、 K_{sw} 値の増加に伴い C_c の最大値およびそれが生じる KC 値は大きくなっている。

$KC=10$ および $KC=6$ の場合における、 C_{LT} と C_c の $Y_{\max}/D$ に対する変化特性を図-5 にそれぞれ示す。図中には、円柱静止時の C_{LT} 値を▲印で示している。円柱静止時の C_{LT} 値が 2.0 と高い値を示す $KC=10$ の場合は、 C_{LT} と C_c は $Y_{\max}/D$ の増加に伴い共に減少している。 C_c の減少度は C_{LT} より大きく、 $Y_{\max}/D=0.6$ 付近では C_{LT} は 0 近くまで減少している。

円柱静止時の C_{LT} 値が 0.1 と非常に小さな値を示す $KC=6$ の場合は、 C_{LT} は $Y_{\max}/D$ の増加に伴い増加している。一方、 C_c はその最大値が生じる $Y_{\max}/D=0.19$ 付近までは $Y_{\max}/D$ の増加に伴い増加し、その後は $Y_{\max}/D$ の増加に伴い減少している。これと類似な揚力係数の渦励振動量に対する変化特性が、一方向流れ場 (Vickery・Watkins, 1962; 林ら, 1997 a) や波動場 (林・Chaplin, 1986) おける円柱の渦励振動においても生じている結果が報告されている。ただし、一方向流れ場の場合には、 C_c の最大値は $Y_{\max}/D=0.4\sim 0.5$ で生じている (林ら, 1997 a)。

$Y_{\max}/D$ の小さい領域で生じる C_c の増加は、流れと円柱振動との相互作用により後流渦の発生強度が増加するためと考えられる。 $Y_{\max}/D$ の増加に伴う C_c の減少は、

円柱の振動に伴い円柱の振動速度方向と反対方向に作用する抗力が増加するために、結果として揚力の円柱の振動速度との同位相成分が減少したためと考えられる。

4. 結 語

振動流場における円柱の渦励振動において生じる、流れと円柱振動との相互作用による作用揚力の変化特性を $KC<20$ の領域で調べた。限られた実験条件の範囲ではあるが以下の主要な結果が得られた。

(1) 振動流場に円柱を弾性的に設置した場合は、 KC 数が 5 以上になると渦励振動による揚力方向の振動問題を考慮する必要がある。

(2) 静止円柱に作用する揚力が小さい $KC=6$ の場合には、渦励振動円柱に作用する揚力の円柱の振動速度との同期成分は、円柱の振動振幅が小さい領域では振動振幅の増加に伴い増加する。

(3) 静止円柱に作用する揚力が大きくなる $KC=10$ の場合には、渦励振動円柱に作用する揚力の円柱の振動速度との同期成分は、円柱の振動振幅の増加に伴い減少する。

参 考 文 献

- 林建二郎・J. R. Chaplin (1986): 波動場で渦励振動している直円柱に作用する揚力評価について, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 511-515.
- 林建二郎・田中克也・藤間功司・重村利幸 (1997a): 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.
- 林建二郎・田中克也・藤間功司・重村利幸 (1997b): 振動流中に置かれた円柱の渦励振動量について, 海洋開発論文集, Vol. 12, (印刷中).
- 林建二郎, 檜垣 太, 藤間功司, 重村利幸 (1995): 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.
- Blevins, R. D. (1977): Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold.
- Griffin, O. M., and G. H. Koopmann (1977): The Vortex-excited Lift and Reaction Forces on Resonantly Vibrating Cylinder, Journal of Sound and Vibration, Vol. 54 (3).
- Sarpkaya, T. (1978): Fluid Forces on Oscillating Cylinders, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 104, WW 4, pp. 275-290.
- Vickery, B. J. and R. D. Watkins (1962): Flow-induced Vibrations of Cylindrical Structures, Proceedings of 1st Australian Conference, held at the University of Western Australia.