

振動流中における円柱の渦励振動特性と流れとの相互作用現象

林 建 二 郎*・藤 間 功 司**・重 村 利 幸***・萩 原 洋 聡****

1. 緒 言

一様定常流中に置かれた構造物の渦励振動特性に関しては、多くの研究がなされており、流れと物体振動との相互作用による Locking-on 現象と呼ばれている非線形な振動応答特性が明かにされている (Blevins, 1977). Locking-on 現象による共振領域および作用揚力の増加は工学的に重要な問題である。類似な流れと物体との相互作用現象が波動場における柱状構造物の渦励振動問題においても生じるものと推測される。しかし、水粒子はオービタル運動を行い、その大きさは水深方向に変化するような複雑な流れ場を有する波動場におけるこの流れと物体との相互作用現象は複雑であり、まだ十分に把握されていないようである (林ら, 1985, 1990 a)。

波動場における構造物の渦励振動問題に関連する基礎的な研究として、振動流中における円柱の渦励振動特性を調べることは有用である。

Rajabi (1979) は、U 字管を用いた振動流発生装置内での円柱の渦励振動特性を $30 < KC \text{ 数} < 130$ の範囲で調べ、最大共振振動量は相対速度 V_r ($V_r = U_m / (f_{nw} \cdot D)$, U_m : 振動流主流速度の最大値, f_{nw} : 円柱の水中固有振動数, D =円柱径) が約 5.5 で生じる現象を報告している。MaConnell・Park (1982) は、静水中を振動する円柱の渦励振動特性を $20 < KC \text{ 数} < 110$ の範囲で調べ、Locking-on 現象は、 KC 数と周波数比 f_{nw}/f_a (f_a : 振動流周波数) によって規定されることを示した。林ら (1990 b, 1991 a, 1991 b) は、振動水槽を用いた振動流発生装置内での円柱の渦励振動特性を $4 < KC \text{ 数} < 50$ の範囲で調べ、 KC 数および周波数比 f_{nw}/f_a に対する円柱の振動応答特性を調べるとともに、流れと円柱振動との相互作用効果に対する検討を行っている。

本研究は、 KC 数の範囲をさらに拡大 (KC 数 < 60) し、一様振動流中における円柱の渦励振動特性を調べるとともに、振動応答のシミュレーション、円柱に作用する流体力計測ならびに円柱まわりの流れの可視化を行い流れ

と円柱振動との相互作用効果を調べたものである。

2. 実験装置及び方法

実験は、ミナーシャモータとボールねじを用いて水平方向に正弦運動する振動台上に固定された鉄枠製ガラス張り水槽を用いて行った (振動流発生装置)。実験装置の概略を図-1 に示す。支点と引っ張りバネを用いて、水槽内に水平設置された試験円柱 (外径 $D=2 \text{ cm}$ or 3 cm , 長さ $=48 \text{ cm}$, アクリル製) は、鉛直方向 (Y 方向, 揚力方向) に振動可能である (詳しくは円振動なので X 方向にも若干振動する)。振動する円柱に作用する流体力の直接測定を行うために、小型 2 分力計に片持梁形式で接続したセグメント円柱 (外径 $=3 \text{ cm}$, 長さ $=3 \text{ cm}$) を外径 $D=3 \text{ cm}$ の試験円柱内に設けた。水槽の振動による自由水表面の動揺を防ぐために、水槽上面にはアクリル板製の上蓋を設けた。試験円柱の両端は、上蓋内に設けられたスリット孔 (幅 $=10 \text{ mm}$) を通る 2 枚の端板 (長さ $=35 \text{ cm}$, 厚さ $=2 \text{ mm}$) で支持されている。端板の幅は $D=2 \text{ cm}$ の円柱の場合 2.5 cm , $D=3 \text{ cm}$ の円柱の場合は 20 cm とした。試験円柱の振動変位 y は、光学式変位計を用いて測定した。水槽振動変位量 a の測定には、ポテンシ

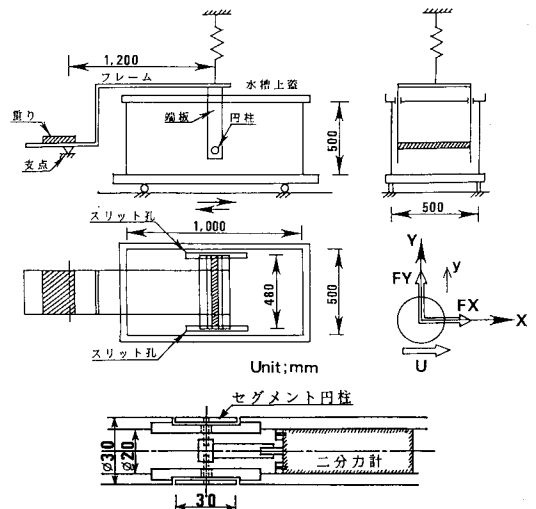


図-1 実験装置の概略

* 正 会 員 Ph.D 防衛大学校土木工学教室 助教授
 ** 正 会 員 工博 防衛大学校土木工学教室 講師
 *** 正 会 員 Dr.Eng. 防衛大学校土木工学教室 教授
 **** 学生会員 西オーストラリア大学環境土木工学科大学院生

表-1 実験ケース

Case	D (cm)	$m_{ew}/\rho D^2$	f_{na} (Hz)	f_{nw} (Hz)	h_{ta}	h_{tw}	KC 数	f_{nw}/f_d	
V1	2	8.92	1.27	1.20	0.003	0.01	10, 17, 25, 50	1.4~11.8	振動円柱
R1	2						10, 17, 25, 50	1.4~11.8	固定円柱
V2	2	8.92	1.27	1.20	0.003	0.01	1.6~60	1, 2……11, 12	振動円柱
R2	2						1.6~60	1, 2……11, 12	固定円柱
V3	3	8.87	1.08	0.92	0.01	0.04	4~19	2	振動円柱
R3	3						4~19	2	固定円柱

オメーターを使用した。

実験に先立ち減衰自由振動実験を行い、試験円柱の空中及び静水中における固有振動数 f_{na} , f_{nw} と減衰定数 h_{ta} , h_{tw} を求めた。円柱の鉛直方向に載荷された分銅荷重とバネ伸張量の関係よりバネ定数を求めた。このバネ定数と水中固有振動数 f_{nw} より、水中付加質量をも含む試験円柱の換算単位長質量 m_{ew} を算定した。Mass-Ratio 値 $m_{ew}/(\rho D^2)$ (ρ : 水の密度, D : 円柱径) は, $D=2$ cm の試験円柱の場合 8.92, $D=3$ cm の場合 8.87 であった。

本実験で行った実験ケースを表-1 にそれぞれ示す。

Case V1 では, KC 数を 10, 17, 25, 50 のそれぞれに固定し振動流の周波数 f_d を変化させ, 周波数比 f_{nw}/f_d の変化に対する試験円柱の渦励振動特性を調べた。

Case V2 では, f_{nw}/f_d を 1, 2……11, 12 のそれぞれ固定し, KC 数の変化に対する渦励振動特性を調べた。

Case R1, Case R2 では, 振動を許さないように設置された上記試験円柱 ($D=2$ cm, 固定円柱) に作用する流体力を, Case V1, Case V2 と同じ KC 数および周波数比 f_{nw}/f_d の範囲でそれぞれ調べた。流体力の計測には, 水槽上方に固定設置された 3 分力計を用いた。

Case V3 では, 揚力の 2 次調和周波数成分と共振している $D=3$ cm の試験円柱の部分長 (セグメント円柱部) に作用する流体力の計測と流れの可視化による円柱後流渦の挙動観察を行った。流れの可視化用トレーサには, ガラス製粒子 (比重 0.98~1.02, 平均粒径 60 μ) を用いた。流況の撮影には VTR カメラを用いた。

Case R3 では, 上記試験円柱 ($D=3$ cm) を固定させ, Case V3 の場合と同様な計測と流れの可視化を行った。

3. 試験円柱の振動方程式

揚力 (Y 方向) にのみ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, (1) 式で表せる。

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

式中, y は円柱の Y 方向振動量である。 $\dot{y}$, $\ddot{y}$ は振動速度および加速度である。 m_{ea} は空中における試験円柱の換

算単位長さ当りの質量 (フレーム (支柱), 重り, 端板等の質量影響をも含む) である。 C_a は空中における換算減衰係数である。 K は換算バネ係数である。

静水中における試験円柱の減衰自由振動方程式は, (2) 式で示される。

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

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 $\ddot{y}$ に比例する慣性力項である。第 2 項は, 円柱の振動速度 $\dot{y}$ の 2 乗に比例する抗力項である。式中 C_M , C_D は, 慣性力係数及び抗力係数である。

(2) 式を, 次式のように変形する。

$$(m_{ea} + C_M \cdot \rho \cdot \pi D^2 / 4) \cdot \ddot{y} + (C_a + C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) \dot{y} + K \cdot y = 0 \quad \cdots \cdots (3)$$

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

(3) 式を, 次式のように変形する。

$$\ddot{y} + 2h_{tw} \cdot 2\pi f_{nw} \cdot \dot{y} + (2\pi f_{nw})^2 \cdot y = 0 \quad \cdots \cdots (4)$$

式中, f_{nw} , h_{tw} は, 次式でそれぞれ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。

$$f_{nw} = (K/m_{ew})^{1/2} / (2\pi) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$h_{tw} = (C_a + C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}|) / (4\pi \cdot f_{nw} \cdot m_{ew}) = C_w / (4\pi \cdot f_{nw} \cdot m_{ew}) \quad \cdots \cdots (6)$$

式中, m_{ew} および C_w は, 次式で示される水中での試験円柱の換算単位長さ当りの質量および減衰係数である。

$$m_{ew} = m_{ea} + C_M \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \quad \cdots \cdots (7)$$

$$C_w = C_a + C_D \cdot \rho / 2 \cdot D \cdot |\dot{y}| \quad \cdots \cdots (8)$$

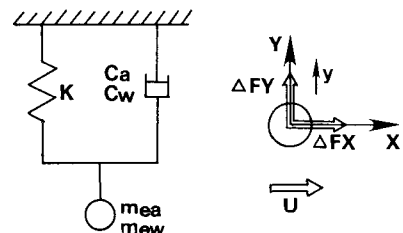


図-2 振動モデル及び座標系

試験円柱の Y 方向に単位長さ当りの揚力(ΔFY)が作用する場合の振動方程式は次式となる。

$$\ddot{y} + 2h_{tw} \cdot 2\pi \cdot f_{nw} \cdot \dot{y} + (2\pi \cdot f_{nw})^2 \cdot y = \Delta FY / m_{ew} \quad \dots\dots\dots (9)$$

4. 実験結果および考察

4.1 減衰定数

Case V1, Case V2の実験に使用した試験円柱の空中および静水中における減衰自由振動記録より、減衰する円柱振動の各半振幅量 AY に対する減衰定数 h_{ta} (空中), h_{tw} (水中)を対数減衰法を用いて算定した結果を図-3に示す。図-3より以下のことが明かである。

1) 空中での減衰定数 h_{ta} は、 AY/D の変化に対してほぼ一定($h_{ta} \approx 0.003$, 表-1に記載)である。

2) 水中での減衰定数 h_{tw} は $AY/D < 0.3$ ではほぼ一定($h_{tw} = 0.01$, 表-1に記載)であるが、 $AY/D > 0.3$ では AY/D の増加とともに大きくなる。従って、 h_{tw} は円柱振動振幅 AY の関数と考えられる(振幅依存性)。

円柱振動振幅 AY の増加に伴う h_{tw} の増加は、 AY/D の増加(=KC数の増加)に伴い発生する円柱後流渦による圧力抵抗に起因すると考えられる(林ら, 1991a)。

実験値 h_{tw} の回帰式として次式が得られる。

$$h_{tw} = 0.01 + 0.045(AY/D)^{2.3} \quad \dots\dots\dots (10)$$

4.2 渦励振動量の推定方法

Case R1, Case R2の各実験で得られた固定円柱の単位長に作用する揚力 ΔFY の時間変動波形に対する試験円柱の振動応答変位 y を、(9)式を用いて算定した。水中減衰定数 h_{tw} は図-3に示すように振幅依存性があることを考慮して、(9)式中の h_{tw} を次式で与えた。

$$h_{tw} = 0.01 + 0.045(|\dot{y}| / (2\pi \cdot f_{nw} \cdot D))^{2.3} \quad \dots\dots (11)$$

共振振動している円柱の振動速度 $\dot{y}$ と振動振幅 AY の関係は、 $\dot{y} = AY \cdot 2\pi \cdot f_{nw} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{nw} \cdot t)$ で表せることを応用して(10)式を修正した(11)式は、円柱振動速度 $\dot{y}$ と h_{tw} との関係を示す。数値計算には線形加速度法を用

いた。得られた振動変位量の代表値として、時間変化波形 y の自乗平均平方根(rms値) AY_{rms} を求めた。

4.3 周波数比 f_{nw}/f_d に対する渦励振動量の変化特性

Case V1, Case V2の実験で得られた円柱の渦励振動応答変位量の代表値として、時間変化波形 y の自乗平均平方根(rms値) AY_{rms} を求めた。

KC数=17, 25, 50のそれぞれにおける無次元値 AY_{rms}/D の周波数比 f_{nw}/f_d に対する変化特性を図-4(a)~(c)に示す。これら図中には、Case R1で得られた揚力の時間変動波形を(9)式に代入してシミュレートした応答振動量の代表値 AY_{rms} (4.2参照)をも記入している。

KC=17の場合、 $f_{nw}/f_d=3$ および4近傍で応答振動量の顕著なピーク値が生じ、その最大値は $f_{nw}/f_d=3$ で生じている。KC=25の場合、 $f_{nw}/f_d=3, 4, 5, 6$ においてピーク値が生じ、その最大値は $f_{nw}/f_d=4$ で生じている。KC=50の場合、固定円柱に作用する揚力のフーリエ解析結果においては8, 9, 10, 11次調和振動成分が卓越するので、応答振動量は $f_{nw}/f_d=8, 9, 10, 11$ でピーク値を示すと推測されるが、しかし、 $f_{nw}/f_d=8, 9, 10$ でのピーク度は鈍く、 $f_{nw}/f_d=6.5 \sim 9$ の範囲全域で大きな応答振動量が生じている。KC=25および50の場合、実験値

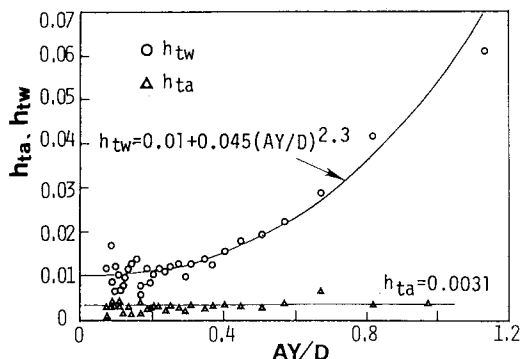


図-3 減衰定数と AY/D の関係

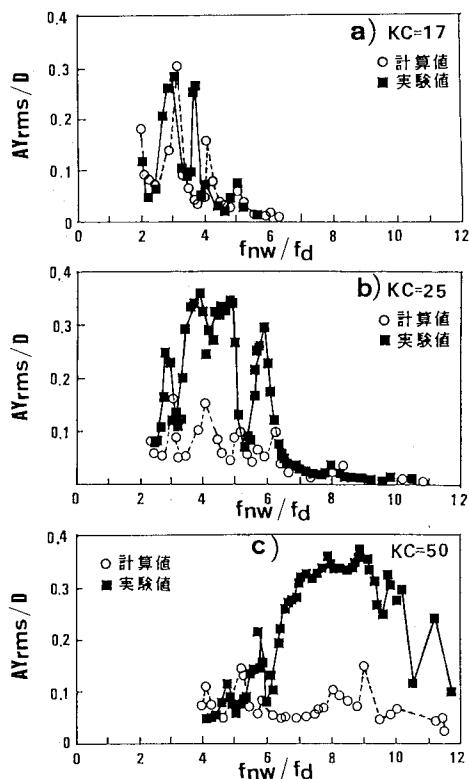


図-4 AY_{rms}/D と f_{nw}/f_d の関係 (■実験値, ○計算値)

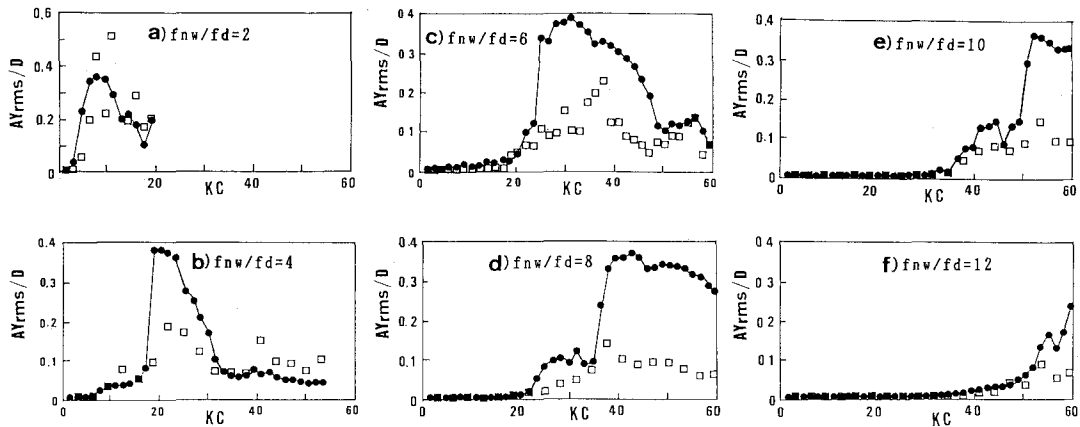


図-5 AY_{rms}/D と KC 数の関係 (●実験値, □計算値)

は計算値より著しく大きくなっている。これらは、定常流中での渦励振動で生じる Locking-on 現象に類する現象であり、共振領域の拡大および作用揚力の増加を引き起こす結果工学的にも重要な現象である。

4.4 KC 数に対する渦励振動量の変化特性

渦励振動量の代表無次元値 AY_{rms}/D の KC 数に対する変化特性を、周波数比 f_{nw}/f_d をパラメータとして図-5 a)～f) にそれぞれ示す。図-4 の場合と同様にこれら図中には、Case R2 で得られた揚力の時間変動波形を用いた計算値 AY_{rms} (4.2, 4.3 参照) をも同時に記入している。

a) 作用揚力の 2 次調和振動成分と円柱が共振している $f_{nw}/f_d=2$ の場合、振動最大値は実験値も計算値も $KC=10$ 近傍で生じている。実験値は計算値より $10 < KC$ の範囲で大きく、 $10 < KC < 15$ の範囲で若干小さい。

b) 作用揚力の 4 次調和振動成分と円柱が共振している $f_{nw}/f_d=4$ の場合、振動最大値は実験値も計算値も $KC=22$ 近傍で生じている。実験値は計算値より $KC < 30$ の範囲で小さく、 $40 < KC$ の範囲で若干大きい。

c) 作用揚力の 6 次調和振動成分と円柱が共振している $f_{nw}/f_d=6$ の場合、振動最大値は実験値の場合 $KC=30$ 近傍で生じ、その後 $KC=40$ までの広範囲で大きな振動量が生じている。計算値の最大値は $KC=38$ 近傍で生じている。実験値は $25 < KC < 50$ の範囲で計算値より大きい。

d) 作用揚力の 8 次調和振動成分と円柱が共振している $f_{nw}/f_d=8$ の場合、振動最大値は実験値の場合 $KC=42$ 近傍で生じ、その後 $KC=60$ (実験における KC 数上限値) までの広範囲で大きな振動量が生じている。計算値の最大値は $KC=40$ 近傍で生じている。実験値は、 $38 < KC$ の範囲では計算値の 3 倍以上となっている。

実験値が計算値よりも大きくなることは、渦励振動時の円柱に作用する揚力は、固定時の円柱 (固定円柱) に作用する揚力よりも、流れと円柱振動と相互作用効果に

より大きくなっていることを示す。

周波数比 f_{nw}/f_d の整数倍値が 6 以上になると、 $25 < KC$ の広範囲で大きな振動量が継続している。これは、 KC 数が大きくなると、幅広く分布する作用揚力の卓越調和周波数成分と円柱が共振し、かつ上記相互作用効果が生じることによるものと考えられる。

波動場に鉛直設置した円柱の渦励振動においても、周波数比 $f_{nw}/f_w=2$ の場合 $8 < CKC < 14$, $f_{nw}/f_w=3$ の場合 $12 < CKC < 24$, $f_{nw}/f_d=4$ の場合 $25 < CKC$ の範囲で、振動量の実験値は、本報告と同様な振動シミュレーション法による計算値より大きくなる結果が報告されている (林ら, 1990 a)。ここで、 f_w は作用波周波数、 CKC は静水表面位置での KC 数である。

4.5 円柱に作用する流体力および後流渦の挙動

Case R3 で得られた固定円柱のセグメント部の単位長

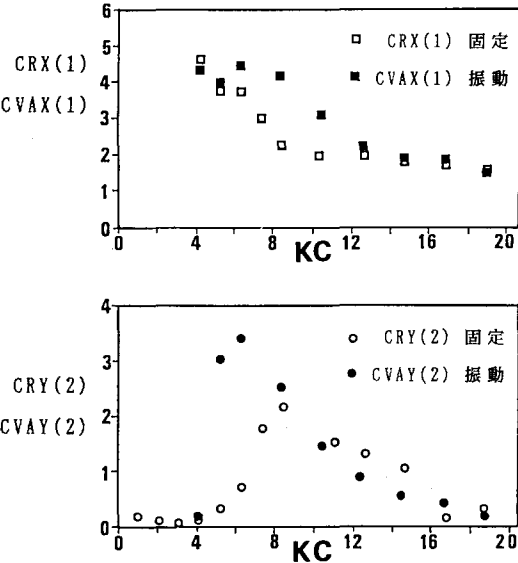


図-6 流体力係数の比較 ($f_{nw}/f_d=2$)

に作用する X 方向と Y 方向の力 ΔFX および ΔFY の時間変動波形に対するフーリエ解析を行い次式で定義される流体力係数を求めた。

$$CRX(1)=\Delta FX \text{ の 1 次調和振動成分/} \\ (\rho/2 \cdot D \cdot U_m^2) \cdots \cdots \cdots (12)$$

$$CRX(1)=\Delta FY \text{ の 2 次調和振動成分/} \\ (\rho/2 \cdot D \cdot U_m^2) \cdots \cdots \cdots (13)$$

Case V3 で得られた振動円柱のセグメント部の単位長さに作用する ΔFX および ΔFY の時間変動波形には、円柱振動によるセグメント円柱部の慣性力が含まれている。空中における減衰自由振動実験結果より推定したこれら力を取り除いたものを $\Delta FVAX$ および $\Delta FVAY$ とし、それら力の時間変動波形に対するフーリエ解析を行い次式で定義される流体力係数を求めた。

$$CVAX(1)=\Delta FVAX \text{ の 1 次調和振動成分/} \\ (\rho/2 \cdot D \cdot U_m^2) \cdots \cdots \cdots (14)$$

$$CVAY(1)=\Delta FVAY \text{ の 1 次調和振動成分/} \\ (\rho/2 \cdot D \cdot U_m^2) \cdots \cdots \cdots (15)$$

これら各流体力係数の KC 数に対する変化特性を図-6 a), b) にそれぞれ示す。CVAX(1)はCRX(1)より $5 < KC < 12$ の範囲で、CVAY(2)はCRY(2)より $5 < KC < 9$ の範囲で大きくなっている。 $KC=6$ 近傍における、CVAY(2)の増加は顕著である。

$KC=6.3$ の場合における、固定円柱および揚力の2次調和振動成分と共振している振動円柱まわりに生成・発達する後流渦挙動の位相変化を図-7に模式的に示す。振動円柱を横切っている水平線は円柱を固定している場合の円柱中心位置を示す。固定円柱の場合、主流振動の半周期毎に上下に非対称な渦対が生成・発達し円柱の右下および左下に弱い渦が形成されている。振動円柱の場合も固定円柱の場合と同様な渦の生成・発達パターンであるが、その規模と大きさは円柱振動が加わる結果、固定円柱の場合より大きくなっている。振動円柱からの渦の生成・発達過程は、安定した共振振動が持続される結果、非常に安定したものであった。

5. 結 言

本報告は、振動流中における円柱の渦励振動特と、その時生じる流れと円柱振動との相互作用効果について調べたものである。以下の主要な結果が得られた。

1) 振動流中における円柱の渦励振動においても定常流中におけるLocking-on現象に類する非線形な振動現象が生じる。その結果、 KC 数が小さい場合 f_{nu}/f_d の整数倍値近傍の極狭い領域のみで生じる共振現象が、 KC 数が大きい場合には f_{nu}/f_d の広い領域で生じている。

2) 渦励振動時の作用揚力が、流れと円柱振動との相

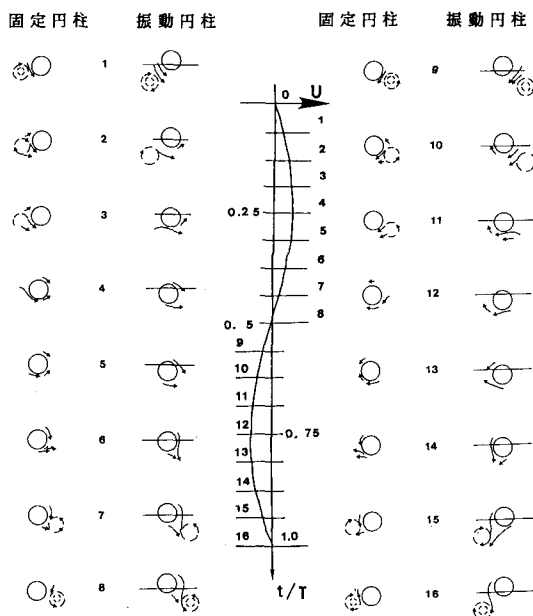


図-7 円柱後流渦の比較 ($f_{nu}/f_d=2$, $KC=6.3$)

互作用効果により固定円柱時よりも大きくなる領域は、 KC 数と周波数比 f_{nu}/f_d によって規定される。

最後に、本研究を推進するにあたり貴重な御助言を賜った本学機械工学教室の別所正利教授および英国 The City 大学の J.R. Chaplin 教授に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 林建二郎, J. R. Chaplin (1985): 波動場における直円柱の渦励振動について, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 633-637.
- 林建二郎, 荻原洋聡, 藤間功司, 重村利率 (1990a): 波動場で渦励振動している直円柱の応答振動量評価について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 676-680.
- 林建二郎, 荻原洋聡, 藤間功司, 重村利率 (1990b): 振動流中で渦励振動している円柱と流れの相互作用について, 水工学論文集, 第 34 巻, pp. 265-270.
- 林建二郎, 荻原洋聡, 藤間功司, 重村利率 (1991a): 振動流中で渦励振動している円柱の非線形振動特性について, 水工学論文集, 第 35 巻, pp. 525-530.
- 林建二郎, 荻原洋聡, 藤間功司, 重村利率 (1991b): 振動流中振動流における円柱の渦励振動特性について, 第 10 回海洋工学シンポジウム, pp. 101-108.
- Blevins, R.D. (1977): Flow-induced vibration, Van Nostrand Reinhold, 363 p.
- McConnell, K. C. and Y.-S., Park (1982): The response and lift-force analysis of an elastically-mounted cylinder oscillating in still water, Proc. of 3rd BOSS Conference, Vol. 2, pp. 671-680.
- Rajabi F. (1979): Hydroelastic oscillations of smooth and rough cylinders in harmonic flow, Ph. D. Thesis, Naval Postgraduate School USA, 295 p.