

# 波動場における直円柱の渦励振動について

林 建 二 郎\*・ J. R. Chaplin\*\*

## 1. 緒 言

柱状海洋構造物は、波の進行方向に作用する進行波力 ( $F_x$ ) およびこれと直角な方向に作用する揚力 ( $F_L$ ) を受ける。従って海洋構造物の設計においては、これら波力の大きさに対する静的な検討に併せて、構造物の動的応答に対する検討も重要である。そこで、波動場に弾性的に設置された直円柱の作用波力 ( $F_x, F_L$ ) に対する動的応答特性を調べる研究がなされている。この場合、円柱の動的応答特性を評価するために、作用波力の評価式にモリソン式、揚力式を用いた振動方程式が多く用いられている<sup>1)~4)</sup>。

進行波力の卓越周波数は、作用波周波数  $f_w$  と同じであるが、揚力の卓越周波数は  $f_w$  の整数倍である。その倍数は Keulegan-Carpenter 数 ( $KC$  数) で規定されている。したがって、揚力に対する円柱の動的応答特性は十分に検討される必要がある。

一様定常流中に静止的に設置された円柱 (静止円柱) は、円柱表面より放出される渦の非対称性の結果生じる揚力を受ける。この揚力の周波数 ( $f_y$ ) は、Strouhal 周波数と呼ばれる円柱放出渦 ( $f_s$ ) の周波数と同じである ( $f_s = SU/D$ ,  $S$ =Strouhal 数,  $U$ =流速,  $D$ =円柱径)。一様流中に弾性的に設置された円柱の、この揚力に対する応答振動は渦励振動と呼ばれ以下の重要な特性が明らかにされている<sup>5)</sup>。

- 1) 渦励振動している小さい減衰係数を持つ円柱は、円柱の固有振動数 ( $f_n$ ) に極近い周波数で振動するため共振現象が生じ、円柱の振動量は増大する。その結果、円柱からの渦の発生周波数 ( $f_s$ ) は、流速の変化にもかかわらず  $f_n$  に極近い一定値に保たれている。
- この現象は lock-on 現象と呼ばれている。
- 2) Lock-on 現象の結果生じる円柱振動量の増加は、通常、円柱発生渦強さの増加を引き起すと共に、円柱発生渦の円柱軸線上の位相を均一化する。その結果、渦励振動中の円柱に作用する揚力は、静止円柱に作用す

る揚力より一般に増大されている。

波動場に弾性的に静水面に対して垂直に設置された直円柱の揚力に対する応答振動においても、上記と同様な渦励振動特性が推測される。しかし、波の水粒子は楕円軌道を描くと共に、その大きさは水深方向に減少するため、円柱から発生する渦の生成発達過程は静止円柱のそれに比べて複雑である。その結果、波動場における直円柱の渦励振動現象はまだ十分に把握されてないようである。そこで、本研究はこの渦励振動特性をより詳しく把握することを目的として、波動場中に弾性的にピボット設置された直円柱の揚力方向振動特性を室内模型実験により調べたものである。

## 2. 振動方程式

本実験で使用された円柱体 (図-1 参照) の揚力方向に対する振動方程式は、円柱体下部のピボット点におけるモーメントの釣り合いを考慮すると式 (1) で表わせる。

$$M_{mt}\ddot{y}_h + C_{mt}\dot{y}_h + K_{mt}y_h = F_{ml} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $y_h$ =静水面における円柱体の揚力方向変位量

$$\dot{y}_h = dy_h/dt, \quad \ddot{y}_h = d^2y_h/dt^2$$

$M_{mt}$ : 全質量マトリックス,  $C_{mt}$ : 全減衰マトリックス

$K_{mt}$ : 全剛性マトリックス

これらマトリックスは波面水位変化量  $\eta$  の関数である。

従って (1) 式は非線型振動方程式である。今、 $\eta$  の影響を無視した上記マトリックスを  $M_{m0}$ ,  $C_{m0}$ ,  $K_{m0}$  とすると、(2) 式で示される線型振動方程式が得られる。

$$\ddot{y}_h + 2\zeta_t\omega_n\dot{y}_h + \omega_n^2y_h = F_{ml}/M_{m0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\omega_n$ ,  $\zeta_t$  は次式でそれぞれ示される、静水中での円柱体の円固有振動数、および減衰係数である。

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{K_{m0}/M_{m0}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\zeta_t = C_{m0}/(2\omega_n M_{m0}) = \zeta_s + \zeta_m + \zeta_f \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\zeta_s$ =バネ部の減衰係数,  $\zeta_m$ =電磁減衰器の減衰係数,  $\zeta_f$ =流体減衰係数

式 (1), (2) 中右辺の  $F_{ml}$  は、試験円柱に作用する揚力による円柱体下部のピボット点まわりのモーメントである。通常用いられる揚力表示式に従うと、 $F_{ml}$  は次式で示される。

\* 正会員 Ph. D. 防衛大学校助手 土木工学教室

\*\* Ph. D. Senior Lecturer, Dept. of Civil Engineering, University of Liverpool, U.K.

$$F_{mi} = \frac{1}{2} \rho \cdot D \cdot \int_0^{d+\eta} C_L u^2 \cdot z \, dz \quad \dots\dots\dots (5)$$

$u$  = 静水面下  $z$  点での波水平水粒子速度  
 $\rho$  = 水の密度,  $C_L$  = 揚力係数,  $d$  = 水深  
揚力係数  $C_L$  は時間  $t$  および  $z$  の関数であるが, 複雑な揚力特性のためその関数形はまだ不明確である. そこで, 便宜的に  $F_{mi}$  を次式で表示する.

$$F_{mi} = \frac{1}{2} \rho D \sum_{n=1}^N C_{Le}(n) \sin(n \cdot \omega_n t + \phi(n)) u_{ms}^2 \cdot d^2 \cdot F_s(kd) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで,  $u_{ms}$  は静水面 ( $z=0$ ) での,  $u$  の最大値,  $C_{Le}(n)$  は次式で示される換算揚力係数  $C_{Le}$  の  $n$  次調和成分

$$C_{Le} = \int_0^{d+\eta} C_L \cdot u^2 z \, dz / \int_0^d u_{ms}^2 z \, dz \quad \dots\dots\dots (7)$$

$f_w$  = 作用波周波数,  $\phi(n) = C_{Le}(n)$  と  $\eta$  の位相差  
 $F_s(kd)$  は次式で定義される,  $u$  の最大値  $u_m(z)$  の 2 乗値の水深方向分布特性を示す指数である.

$$F_s(kd) = \int_0^{d+H/2} u_m^2(z) \cdot z \, dz / (u_{ms}^2 d^2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$k = 2\pi/L \quad L = \text{波長} \quad H = \text{波高}$$

式 (2) の解は次式で示される.

$$\frac{y_h}{D} = \frac{3F_s(kd) \cdot SKC^2 \cdot (f_w/f_n)^2}{8\pi^2(m_e/\rho D^2)} \times \sum_{n=1}^N \frac{C_{Le}(n) \sin(2\pi n f_w t + \phi_A(n))}{\sqrt{(1 - (n f_w/f_n)^2)^2 + (2\zeta_t n f_w/f_n)^2}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで,  $m_e$  は次式で与えられる, 円柱体の換算単位質量である.

$$m_e = M_{m0} / \int_0^d (z/d) \cdot z \, dz = 3M_{m0}/d^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

又,  $SKC$  は次式で与えられる表面  $KC$  数である

$$SKC = u_{ms} \cdot T/D \quad \dots\dots\dots (11)$$

$\phi_A(n)$  は, 次式で示される  $y_h$  と  $F_{mi}$  の位相差である.

$$\phi_A(n) = \tan^{-1} \{ 2\zeta_t n f_w/f_n / (1 - (n f_w/f_n)^2) \} \quad \dots\dots\dots (12)$$

揚力の  $n$  次調和周波数と, 円柱体の固有振動数が一致する共振点 ( $f_w/f_n = 1/n$ ,  $n=1, 2, 3, \dots$ ) では,  $y_h$  は次式で示される.

$$\frac{y_h}{D} = \frac{3F_s(kd) \cdot SKC^2 \cdot (f_w/f_n)^2}{4\pi^2 m_e (2\pi \zeta_t / \rho D^2)} \times C_{Le}(n) \sin(2\pi n f_w t + \phi_A(n)) \quad \dots\dots\dots (13)$$
$$\phi_A(n) = \pi/2$$

式 (9) は, 円柱体の渦動振動振幅は以下のパラメータで支配されることを示している.

$$[kd, SKC, f_w/f_n, m_e/\rho D^2, C_{Le}, \zeta_t]$$

ここに,  $m_e/\rho D^2$  は Mass Ratio である.

式 (13) は, 共振時での円柱体の振動振幅は以下のパラメータで支配されることを示している.

$$[kd, SKC, f_w/f_n = 1/n, C_{Le}, 2m_e \cdot (2\pi \zeta_t) / \rho D^2]$$

ここに,  $2m_e(2\pi \zeta_t) / \rho D^2$  は Reduced Damping である.

### 3. 実験装置および方法

#### 3.1 実験装置

実験は, リバプール大学土木工学教室に設置されている長さ 18 m, 幅 0.75 m, 高さ 1 m の 2 次元造波水槽を用いて行なった. 水槽の一端にはピストン型造波装置が, その他端には 1/6.4 勾配の消波装置が設えられている. 実験に使用した円柱体は造波装置の前方 7.3 m の位置に設置された.

実験で使用した円柱体の概略を図-1 に示す. 実験円柱は, 外径  $D=19.05$  mm, 肉厚  $=0.536$  mm, 長さ  $=985$  mm のステンレス管製である. この試験円柱は径 10 mm, 長さ 1105 mm の心軸円柱 (アルミ製) に接続されている. 心軸円柱の上部は揚力の作用両方向に引張りバネを用いて支持され, その下部は試験円柱支持板 ( $200 \times 50 \times 6$  mm) に接続されている. 試験円柱

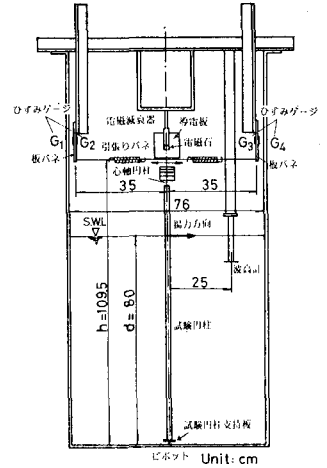


図-1 実験装置の概略

支持板の水路方向両端は, ピボットの的に実験水槽床部に置かれている. 従って, 試験円柱の振動は揚力方向のみに制限されている. 2 組の引張りバネはそれぞれステンレス製の板バネ ( $100 \times 10 \times 3$  mm) で支持されている. 板バネの表裏には板バネの下端に作用するバネの伸長力による曲げモーメントを測定するために, ひずみゲージが貼られている. これらひずみゲージは, 心軸円柱上端の揚力方向振動量に対応する信号を得るためにホイーンストブリッジ回路に組み込まれている.

円柱体の質量を調整するために, 心軸円柱上部には鉄製の荷重円盤が取り付けられている. 円柱体の減衰係数  $\zeta_t$  を調整するために, アルミ製の導電板と電磁石より構成される電磁減衰器を心軸円柱上端に設けている.

上記実験装置は, 1) 円柱体がピボット設置されているために, 振動モードが単純であること, 2) 円柱体の固有振動数  $f_n$ , および減衰係数  $\zeta_t$  の調整が容易であること等の利点を有している.

#### 3.2 実験方法

実験に先だち, 円柱体の自由振動実験を空中, 静水中でそれぞれ行ない. 空中, 静水中における円柱体の固有

振動数  $f_{na}$ ,  $f_{nw}$ , および減衰係数  $\zeta_{ta}$ ,  $\zeta_{tw}$  をそれぞれ求めた. この自由振動実験は, 電磁減衰器の使用電流  $I_e$  によって調整される各減衰係数のもとで行なった.

円柱体の剛性マトリックス  $K_{mt}$  は, 静水中に設置された円柱体の揚力方向へ各種検定荷重を作用させて得られた円柱体の変位量と, ビポット点でのモーメントの検定結果より算定した ( $K_{mt}=K_{m0}$ ). 静水中での円柱体の全質量マトリックス ( $M_{m0}$ ) および換算単位質量  $m_e$  (付加質量の影響を含む) は, 上記の測定値  $f_{wn}$ ,  $K_{m0}$  を式 (3), 式 (10) へ代入して求めた.

本実験で行なった測定ケースを表一に示す. 実験水深  $d$  は 80 cm, Mass Ratio ( $m_e/\rho D^2$ ) は 15.7 である. Case A-1, A-2 は, SKC をそれぞれ約 12, および約 20 に固定した場合の周波数比  $f_w/f_{nw}$  の変化に対する, 円柱体の渦励振動特性を調べたものである. Case AB-1 は, 渦励振動特性に対する円柱体の減衰係数の影響を調べるために, 減衰係数  $\zeta_{ta}$  を, Case A-1, A-2 における 0.001 から 0.021 へ変化させて, Case A-1 と同様な実験を行なったものである. Case AS-1, Case AS-2 は, 上記各実験ケースに使用した作用波と同様な作用波中に, バネ係数  $K_s$  が非常に大きな引張りバネを用いて円柱体を静止的に設置した場合の円柱体に作用する揚力特性を調べたものである.

水位変動  $\eta$  の測定には, 抵抗線式波高計を使用した. この波高計からの出力信号は, 前述のブリッジ回路からの揚力方向振動量に対応する出力信号と共に, 当教室所有のミニコンピュータ内のディスクに記録した. 円柱体の渦励振動特性および静止円柱体に作用する揚力の不規則性を考慮するために, これら出力信号の記録時間は, 作用波周期の 50~100 倍である.

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 減衰係数

空中および静水中での自由振動実験で得られた, 円柱体の振動振幅減衰記録より, 各振動振幅量  $Y_{hi}$  に対する減衰係数  $\zeta_{tai}$  (空中),  $\zeta_{twi}$  (静水中) を算定した.

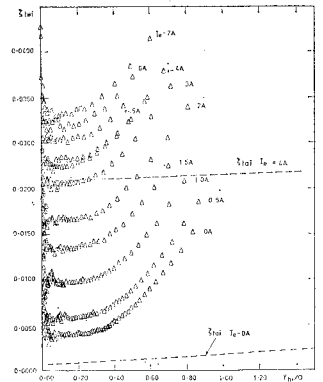
$\zeta_{tai}$ ,  $\zeta_{twi}$  と  $Y_{hi}/D$  の関係を電磁減衰器に使用した電流値  $I_e$  をパラメータとして図一に示す ( $\zeta_{tai}$  の場合は  $I_e=0$  A と 4 A のみ). 図より,  $\zeta_{tai}$  は  $Y_{hi}/D$  に対してほとんど無関係であるが,  $\zeta_{twi}$  は  $Y_{hi}/D$  に値に大きく影響されていることが明らかである.

$\zeta_{twi}$  と  $\zeta_{tai}$  の差は流体減衰係数  $\zeta_f$  を示している.  $Y_{hi}/D$  の増加にともなう  $\zeta_f$  の著しい増加は, 円柱体の振動量の増加にともない KC 数が大きくなり, 円柱後流渦が形成される結果, 円柱体に作用する抗力が増加したためと思われる. 表一に記入されている, Case A-1, Case A-2 における  $\zeta_{ta}$ ,  $\zeta_{tw}$  は  $I_e=0$  A の場合の  $Y_{hi}/D=0.1$  における  $\zeta_{tai}$ ,  $\zeta_{twi}$  の値である. Case AB-1 の  $\zeta_{ta}$ ,  $\zeta_{tw}$  は  $I_e=4$  A の場合の  $Y_{hi}/D=0.1$  における  $\zeta_{tai}$ ,  $\zeta_{twi}$  の値である.

#### 4.1 渦励振動特性の概略

不規則性を有する波動場における円柱体の渦励振動特性を調べるために以下の統計量を算出した.

- 静水面における円柱体の振動量  $y_h$  の 1/2 peak-to-peak 値  $Y_{hi}$  の平均値 ( $Y_{hm}$ ), およびその変動係数 ( $C_{vr}$ ,  $C_{vr}=Y_{hi}$  の標準偏差/2  $Y_{hm}$ )
  - 円柱体の渦励振動数  $f_{yi}$  の平均値 ( $f_{ym}$ )
- Case A-2 における, 上記各係数の無次元値,  $Y_{hm}/D$ ,  $f_{ym}/f_{nw}$ , および変動係数  $C_{vr}$  と周波数比  $f_w/f_{nw}$  の関係を図一に示す.  $f_w/f_{nw} \div 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6$  で以下の現象が認められる.
- $Y_{hm}/D$  はピーク値を示す.
  - $f_{ym}$  は円柱体の水中固有振動数に近づく
  - $C_{vr}$  は非常に小さな値 ( $C_{vr}<0.1$ ) となる.



図一 減衰係数

表一 実験条件 (Case A-1, A-2, AB-2……振動円柱, Case AS-1, AS-2……静止円柱)

| Case | Mass Ratio     | $f_{na}$ | $f_{nw}$ | SKC                                                      | $f_w/f_{nw}$ | $kd$      | $\zeta_{ta}$ | $\zeta_{tw}$ | Reduced Damping ( $\delta_r$ )  |
|------|----------------|----------|----------|----------------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------|
|      | $m_e/\rho D^2$ |          |          |                                                          |              |           |              |              | $2m_e(2\pi\zeta_{ta})/\rho D^2$ |
| A-1  | 15.7           | 1.52     | 1.46     | 12 $\begin{smallmatrix} +1.07 \\ -2.1 \end{smallmatrix}$ | 0.237~1.07   | 0.67~7.98 | 0.001        | 0.004        | 0.20                            |
| A-2  | 15.7           | 1.52     | 1.46     | 20 $\begin{smallmatrix} +4.7 \\ -3 \end{smallmatrix}$    | 0.766~0.577  | 0.85~2.33 | 0.001        | 0.004        | 0.20                            |
| AB-1 | 15.7           | 1.52     | 1.46     | 12 $\begin{smallmatrix} +2.1 \\ -5.6 \end{smallmatrix}$  | 0.315~1.05   | 0.93~7.64 | 0.021        | 0.023        | 4.14                            |
| AS-1 | 15.7           | 12.5     | 12.0     | 12 $\begin{smallmatrix} +3.2 \\ -1.3 \end{smallmatrix}$  | 0.025~0.066  | 0.57~2.09 |              |              |                                 |
| AS-2 | 15.7           | 12.5     | 12.0     | 20 $\begin{smallmatrix} +3.5 \\ -0.7 \end{smallmatrix}$  | 0.039~0.065  | 0.95~2.05 |              |              |                                 |

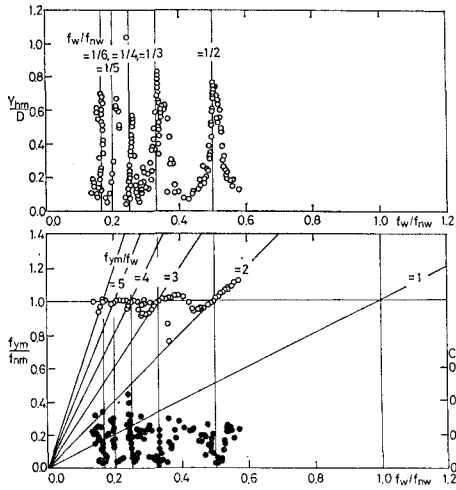


図-3 渦励振動特性の概略 (Case A-2)

小さい  $C_{vr}$  値は、振動現象が大変規則的なことを示している。多数のピーク値の出現原因として以下の点が考えられる<sup>1),6)</sup>。

a) 円柱体に作用する揚力の各調和周波数成分 ( $nf_w$ ,  $n=1, 2, 3, \dots$ ) と円柱体の固有振動数  $f_{nw}$  とが一致した結果生じる共振現象。

b) 共振による振動量の増加によって引き起こされるだろう、発生渦の強度の増加および円柱軸線上での発生渦の位相の均一化による、円柱体に作用する揚力の増加。

Case A-1 ( $SKC \approx 12$ ) の場合にも上記と同様な渦励振動現象が認められた。しかし  $f_w/f_{nw} = 1/4, 1/5, \dots$  での  $Y_{hm}/D$  のピーク値出現は Case A-2 の場合のように明確ではない。

#### 4.3 渦励振動の詳細

波動場における円柱体の渦励振動特性をより詳しく示すと同時に、減衰係数  $\zeta_{ta}$  の渦励振動特性におよぼす影響を示すために、Case A-1 ( $\zeta_{ta}=0.001$ ) と Case AB-1 ( $\zeta_{ta}=0.021$ ) の場合の  $Y_{hm}/D$ ,  $f_{ym}/f_{nw}$ ,  $C_{vr}$  と  $f_w/f_{nw}$  の関係を図-4 にそれぞれ示す。

$f_w/f_{nw}$  が 0.45 から 0.55 の範囲での円柱の渦励振動特性に着目すると以下の点が認められる。

1)  $f_w/f_{nw}$  が 0.45 から 0.515 の範囲では、 $f_{ym}/f_{nw}$  と  $f_w/f_{nw}$  の関係は、Case A-1, Case AB-1 とともに、Case AS-1 で得られた静止円柱に作用する揚力の卓越周波数  $\hat{f}_L$  と作用波周波数  $f_w$  の関係を示す次式の線の上にプロットされている。

$$\hat{f}_L/f_{nw} = 2f_w/f_{nw} \dots\dots\dots (14)$$

$Y_{hm}/D$  のピーク値は、両ケースとも  $f_w/f_{nw} = 0.5$  の予想共振点ではなく、 $f_w/f_{nw} \approx 0.503$  で生じている。この現象は、波動場で渦励振動している円柱体の固有振動数は静水中での固有振動数  $f_{nw}$  より若干増加しているこ

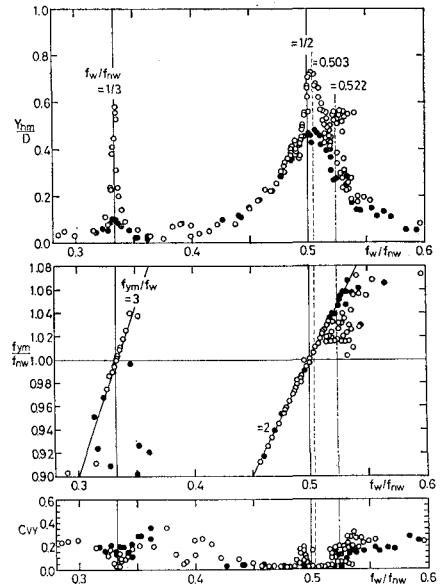
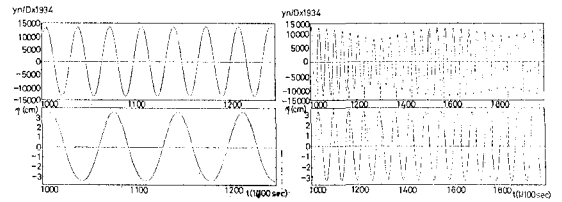
○ Case A-1 ( $\zeta_{ta}=0.001$ ), ● Case AB-1 ( $\zeta_{ta}=0.021$ )

図-4 渦励振動特性の詳細

(a)  $f_w/f_{nw} = 0.503$ (b)  $f_w/f_{nw} = 0.522$ 図-5  $\eta$ ,  $y_k/D$  の時間変化

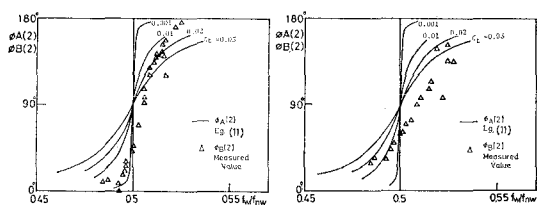
とを示している。この原因としては、波動場における渦励振動時の円柱体の付加質量が、静水中での自由振動時の付加質量より減少していることが考えられる。一様定常流における円柱の渦励振動時その付加質量の減少が Sarpkaya<sup>7)</sup> 等によって報告されている。

2) Case A-1 の場合、 $f_w/f_{nw}$  が 0.52 から 0.53 の範囲で、 $f_{ym}/f_{nw}$  は式 (2) に示される関係よりはずれ、 $f_{ym}/f_{nw} \approx 1.018$  の一定値を保っている。一方、 $Y_{hm}/D$  は  $f_w/f_{nw} \approx 0.522$  で第 2 ピーク値を示している。この現象は、円柱体の振動数  $f_{ym}$  が、静止円柱に作用する揚力の周波数と円柱の固有振動数との間のある一定値に保持されている点において、1. で述べた一様定常流中での lock-on 現象に類似している。しかし、減衰係数が大きい、Case AB-1 ( $\zeta_{ta}=0.021$ ) の場合には、上記現象は認められない。このことは、大きな減衰係数を有する円柱の場合、一様定常流での渦励振動においては lock-on 現象が生じないことと対応している<sup>8)</sup>。

Case A-1 の測定で、 $Y_{hm}/D$  の第 1 ピークおよび第 2 ピークが生じている場合、円柱体の振動  $y_h$  と水面変

動の時間変化例を図-5 (a), (b) にそれぞれ示す。図中 (a) に示されている第 1 ピークの場合は,  $y_h$  の時間変化は非常に規則的であると同時に,  $f_{ym}=2f_w$  の関係が保たれているため  $y_h$  と  $\eta$  との位相差は一定である。一方, 図中 (b) に示されている第 2 ピークの場合は, 図-4 に示されているように  $f_{ym}$  は  $2f_w$  より若干小さいため,  $y_h/D$  と  $\eta$  との位相差は時間的に変化している。図中に示されている  $y_h/D$  の規則的な振幅変調現象は, この  $y_{hm}/D$  と  $\eta$  との位相差が時間的に変化するために生じるだろう円柱からの放出渦過程の時間変化に伴う揚力の時間変化によるものと思われる。

#### 4.4 位 相 差



(a) Case A-1 ( $\zeta_{ta}=0.001$ ) (b) Case AB-1 ( $\zeta_{ta}=0.021$ )

図-6 位 相 差

Case A-1 と Case AB-1 において,  $Y_{hm}/D$  の第 1 ピーク値が生じている  $f_w/f_{nw} \approx 0.503$  近傍での,  $y_h$  と  $\eta$  の位相差  $\phi_B(2)$  と  $f_w/f_{nw}$  の関係を図-6 (a), (b) にそれぞれ示す。ここに,  $\phi_B(2)$  は  $y_h$  および  $\eta$  の時間変動データの Fourier 級数展開結果より得られた値である。図中には, 式 (12) で示されている  $y_h$  と  $F_{mi}$  の位相差  $\phi_A(2)$  の値を減衰係数  $\zeta_t$  をパラメータにして示している。4.3 で示された理論共振点 ( $f_{ym}/f_{nw}=0.5$ ) と実測共振点 ( $f_{ym}/f_{nw}=0.503$ ) の差, および  $\eta$  と  $F_{mi}$  の位相差等を考慮する必要があるが, 実測値  $\phi_B(2)$  の共振点近傍での勾配  $\partial\phi_B(2)/\partial(f_w/f_{nw})$  は, 下記の  $\zeta_{tm}$  値を代入した場合の  $\phi_A(2)$  の勾配  $\partial\phi_A(2)/\partial(f_w/f_{nw})$  に等しい。

$$\zeta_{tm} \approx 0.01 \dots \dots \dots \text{Case A-1}$$

$$\zeta_{tm} \approx 0.03 \dots \dots \dots \text{Case AB-1}$$

Case A-1 および Case AB-1 の  $Y_{hm}/D$  の第 1 ピーク値 0.72 および 0.48 に対応する静水中での自由振動時の減衰係数  $\zeta_{tv}$  はそれぞれ 0.012 と 0.032 である (図-2 参照)。これら  $\zeta_{tv}$  は上記の  $\zeta_{tm}$  とほぼ一致している。このことは, 未知量である渦励振動時の減衰定数の推定値として, 静水中における試験円柱の自由振動減衰の測

定より得られる減衰係数の使用が有意義であることを示している。

## 5. 結 言

以上は, 波動における渦励振動特性を室内模型実験により調べ, 一様定常流中における渦励振動特性と比較検討したものである。主要な結果として以下の 2 点があげられる。

- 1) 波動場における渦励振動においては, 作用揚力の各調和周波数と円柱固有振動数が一致する  $f_w/f_{nw}$  で共振現象が生じる。SKC=20 である Case A-2 の場合には,  $f_w/f_{nw}=1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6$  で共振現象が生じた。
- 2) 減衰係数が小さい場合に, 一様定常流中における渦励振動において生じる lock-on 現象と類似な現象が, 波動場における渦励振動においても生じる (減衰係数が小さい時のみ)。Case A-1 の場合には,  $f_w/f_{nw}=1/2$  の近傍値  $f_w/f_{nw}=0.523$  で  $Y_{hm}/D$  のピーク値が生じた。

同時に調べられた, 波動場における渦励振動特性に対する KC 数の影響, および渦励振動時の円柱に作用する揚力値に対する検討は, 今後別の機会に述べる予定である。上述の波動場における lock-on 現象を評価できる, 振動モデル式については現在検討中である。

最後に, 有益な討論ならびに助言をして下さいました London 大学 Imperial College の P. W. Bearmon 先生ならびに図面の作製にご協力いただいた防衛大学校, 土木教室工藤誠技官に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 樺木 亨・中村孝幸・三木秀樹: 波動場の円柱後流渦による振動応答の実態とその予測について, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 33~38, 1976.
- 2) 吉原 進: 可とう円柱に作用する規則波の波力, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 362~366, 1977.
- 3) 椎貝博美・関口定男・星野久雄: ヒンジで支えられた柱状海洋構造物の振動特性, 土木学会論文報告集, 第 342 号, pp. 153~160, 1984.
- 4) 石田 啓: 波による柱状構造物の動的応答について, 第 20 回水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, 1984.
- 5) Blevins, R. D.: Flow-induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, 1977.
- 6) Angrilli, F. and V. Cossalter: Transverse Oscillations of a Vertical Pile in Waves, Journal of Fluid Engineering, Vol. 104, pp. 46~53, 1982.
- 7) Sarpkaya, T.: Fluid Forces on Oscillating Cylinders, Jour. Waterways etc. Div., ASCE, Vol. 104, WW4, pp. 275~290, 1978.
- 8) King, R.: A Review of Vortex Shedding Research and its Application, Ocean Engng., Vol. 4, pp. 141~171, 1977.