

## 大型浮体の波浪中動揺の実海域計測とそのシミュレーション

Evaluation of Wave Response of a Large Floating Structure by Field Measurement and Simulation

小崎洋平\*, 宇都宮智昭\*\*, 加藤俊司\*\*\*, 難波康広\*\*\*\*, 佐藤宏\*\*\*\*\*, 湯川和浩\*\*\*\*\*

Yohei KOSAKI, Tomoaki UTSUNOMIYA, Shunji KATO, Yasuhiro NAMBA,

Hiroshi SATO and Kazuhiro YUKAWA

\*京都大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*工博, 京都大学助教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*\*工博, (独)海上技術安全研究所海洋空間利用グループ (〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1)

\*\*\*\*工博, (独)海上技術安全研究所海洋空間利用グループ (〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1)

\*\*\*\*\* (独)海上技術安全研究所海洋空間利用グループ (〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1)

\*\*\*\*\*工博, (独)海上技術安全研究所海洋空間利用グループ (〒181-0004 三鷹市新川 6-38-1)

This paper presents field measurement of wave response of a large floating structure located at Awaji-island. The vertical elastic response and the horizontal motion as a moored vessel have been measured, and compared with the simulated values. The vertical hydroelastic responses have been compared in the frequency domain, and a good agreement has been obtained. The horizontal motion has been simulated in the time-domain where the nonlinear mooring restoring force characteristics and the memory effect are considered, and also a good agreement has been obtained, if the clearances at the fenders are adjusted. Basically, the simulation presented in this paper can represent the measured values; however, further improvement to consider the multi-directional irregular sea-state may be necessary.

**Key Words :** field measurement, hydroelasticity, memory effect, VLFS

## 1. はじめに

超大型浮体工法は、大水深・軟弱地盤域に対応可能で、免震性に優れ、また海洋環境にも優しい等、様々な特徴を有している。その特徴を生かし、浮体式海上空港や浮体式情報バックアップ基地等としての利用を目指して、設計・製作・施工法ならびに機能性の実証のための実海域での実証実験が行われてきた<sup>1)</sup>。現在、厳しい気象・海象条件下でのデータ取得ならびに長期健全性予測診断システムの信頼性向上等を目的として、著者らは、『南あわじ市浮体式多目的公園』において2004年より浮体鉛直応答・動揺等の長期連続計測を実施中である。

本研究では、この長期計測中の台風14号(平成17年9月6日)通過時に取得された実海域計測データを用いて、厳しい海・気象条件における浮体構造物の水平動揺解析および鉛直たわみ振動に関する弾性応答解析を行った。これらの解析結果を実測データと比較検討することにより、実海域での浮体構造物の動揺応答がシミュレーションによってどの程度再現されるかの検証を行う。また、今回の検証結果をふまえて、今後のより精度の高いモデル化および解析手法の開発につなげることを目的とする。

## 2. 実海域計測の概要

## 2.1 対象構造物

対象構造物は鋼製箱型浮体構造物であり、横須賀市沖で海上空港の実証実験に使われていた『メガフロート浮体空港モデル』の一部が現在は南あわじ市の福良港沖合に設置され、海釣りを中心にイベントなどが開催できる浮体式多目的公園として使用されている施設である。ここで、本研究における座標系を図-1、本計測における計測機器配置図および計測項目について図-2および表-1に示す。ただし、相対水位計は浮体の4隅についている。また、本施設的设计条件の概略について表-2に示す。

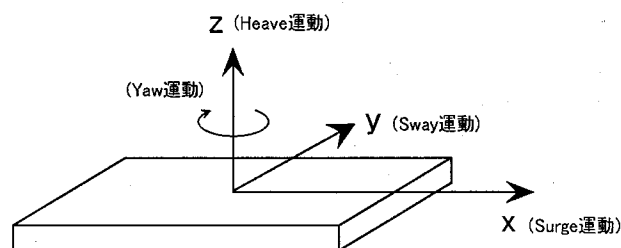


図-1 座標系

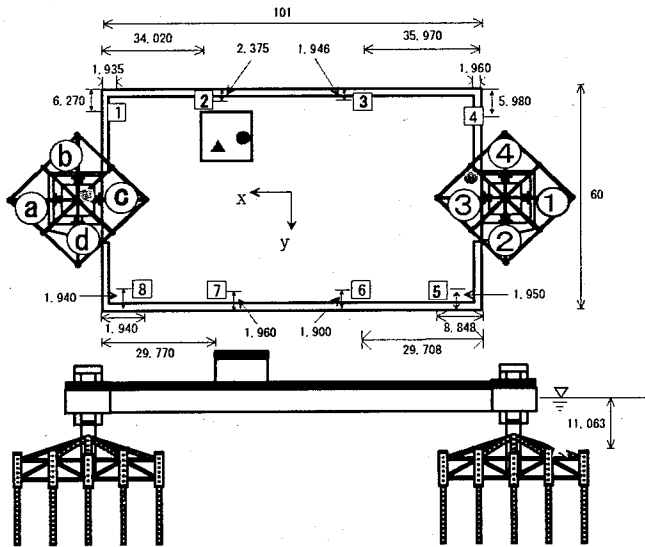


図-2 計測機器配置図

表-1 計測項目

|   | 計測項目    | 数量  | 計測センサー        |
|---|---------|-----|---------------|
|   | 流向流速    | 1台  | 超音波流向・流速計&水圧計 |
| ▲ | 風向風速    | 1台  | 超音波2軸風向・風速計   |
| ● | 水平面内動揺  | 3局  | KGPS          |
| □ | 上下加速度   | 8台  | サーボ式加速度計      |
| ○ | フェンダー変位 | 8ch | ワイヤー巻き取り式変位計  |
|   | 相対水位    | 4ch | 水圧式水位計        |

表-2 設計条件

| 再現期間 |       | 30年           |
|------|-------|---------------|
| 長周期波 | 有義波高  | 1.6m (最大2.9m) |
|      | 有義波周期 | 16.0s         |
| 風波   | 有義波高  | 2.5m (最大4.5m) |
|      | 有義波周期 | 4.7s          |
| 風    |       | 平均風速40m/s     |
| 潮流   |       | 1.0m/s        |

## 2.2 データ解析

### (1) 入射波方向の決定

今回の対象構造物には流速計が設置されており、直交する2方向の流速が時刻歴で得られている。それらを用いて単一方向波としての波向きを決定した。決定方法は、流速の大きい方から1/4のデータを用いて、2方向の流速から波向きを求め、それらを傾度分布で表し、その重心をとることで本研究での入射波の代表波向きとした。決定された入射波方向を図-3に示す。また、本研究では600sの実測データを用い、600sの解析を行った。

### (2) 水圧波から表面波への換算

浮体構造物に作用する入射波高、反射波高を計測するために、本来は海上沖および浮体構造物周辺に超音波式波高計などの波浪観測機器が設置されることが望ましい。しかし、今回の実海域計測においては、漁業権の制約等によりそのような波高計測機器は設置されておらず、係留ドルフィン・ジャケット部分に設置された水圧計で計測される水圧変動から表面波の波高を推定する必要がある。水圧波（水圧/ $\rho g$ で定義され、長さの単位を有する。

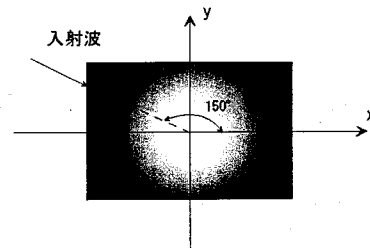


図-3 入射波方向

ただし、 $\rho$ : 流体密度、 $g$ : 重力加速度) から表面波へ換算する方法は大別すると2つに分類できる。(1)水圧波の周波数スペクトルに周波数応答関数を乗じて表面波の周波数スペクトルを推定する周波数領域での解析法と、(2)水圧波と表面波との関係を表す回帰式をもとに表面波を推定する時間領域での解析法である。今回は前者の周波数領域での解析法を用いて表面波への換算を行う<sup>23)</sup>。

表面波 $\eta(t)$ および水圧波 $p(t)$ の周波数スペクトルをそれぞれ $S_\eta(\omega)$ 、 $S_p(\omega)$ とすると、線形波理論の範囲内では両者は次式で関係付けられる。

$$S_p(\omega) = K(\omega)^2 S_\eta(\omega) \quad (1)$$

$$K(\omega) = \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} \quad (2)$$

ここに、 $K(\omega)$ は表面波から水圧波への伝達関数、 $k$ は波数、 $h$ は水深、 $z$ は水圧計の設置水深であり、自由水面を基準に上方を正とする。波数 $k$ は次式で表される分散関係式、

$$\omega^2 = (2\pi f)^2 = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

により角周波数 $\omega$ あるいは周波数 $f$ と関係付けられる。従って、水圧波の周波数スペクトル $S_p(\omega)$ が得られるならば、次式によって表面波の周波数スペクトルが得られる。

$$S_\eta(\omega) = \frac{S_p(\omega)}{K(\omega)^2} = H(\omega)^2 S_p(\omega) \quad (4)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{K(\omega)} = \frac{\cosh(kh)}{\cosh\{k(h+z)\}} \quad (5)$$

ここで、 $H(\omega)$ は周波数応答関数である。ただし、 $K(\omega)$ は短周期側では大きく誇張されることが文献<sup>2)</sup>より経験的に分かっているため、ある周波数以上で一定にする必要がある。その手法としては、様々なものが提案され、その妥当性は実験や観測により種々検討されているが、本研究ではその文献<sup>2)</sup>の手法を用いた。

求めた周波数スペクトルより各周波数毎の表面波の振幅 $a_k$ は、

$$\left. \begin{aligned} S_\eta(\omega_k) \Delta\omega &= \frac{1}{2} a_k^2 \\ \Delta\omega_k &= \omega_k - \omega_{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

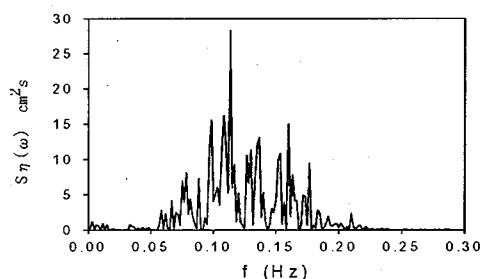


図-4 表面波の周波数スペクトル

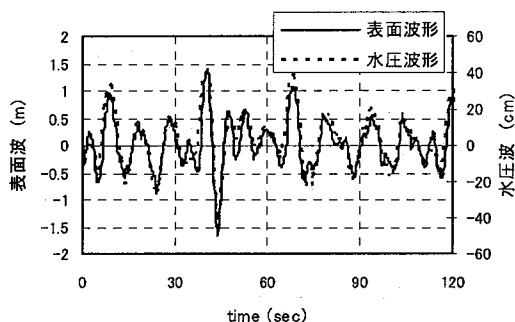


図-5 表面波形と水圧波形

の関係式により求まる。さらに、水圧波をフーリエ解析した時に求まる位相 $\theta_k$ を用いて、

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (7)$$

により表面波形を求めた。

この換算によって得られた表面波の周波数スペクトルおよび表面波形を図-4、図-5に示す。

### 3. 鉛直方向の弾性応答解析

#### 3.1 解析手法

本節では、鉛直方向の弾性応答解析を行う<sup>45)</sup>。浮体構造物のたわみ応答変位 $w(x,y)$ について、流体運動を表す速度ポテンシャルに関する境界積分方程式と周辺自由の長方形板における運動方程式よりモード応答変位振幅を求め、それをモード関数の重ね合わせの式、

$$w(x,y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \zeta_{mn} f_m(x) g_n(y) \quad (8)$$

に代入することで近似的に得られる。ただし、 $\zeta_{mn}$ はモード応答変位振幅、 $f_m(x)$ および $g_n(y)$ は両端自由ばりの自由振動に関するモード変位関数である。ここで、浮体構造物の応答変位を求めるにあたり、底面は鉛直運動のみを行い、水平面内の運動は拘束されているものとする。浮体構造物の主要諸元を表-3に示す。

#### 3.2 解析結果および考察

前述の手法を用いて、単位片振幅波高の入射波に対する周波数応答関数を加速度計が設置されている8箇所に

表-3 浮体構造物の主要諸元

|       |      |                          |
|-------|------|--------------------------|
| 長さ    | L    | 101.5(m)                 |
| 幅     | B    | 60(m)                    |
| 深さ    | D    | 3(m)                     |
| 喫水    | d    | 12(m)                    |
| 横曲げ剛性 | EI/B | $2.04 \times 10^7$ (kNm) |
| 縦曲げ剛性 | EI/L | $1.66 \times 10^7$ (kNm) |
| 水深    | h    | 25(m)                    |

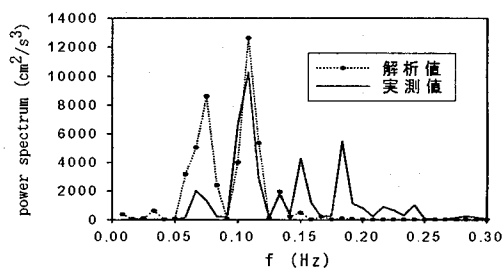


図-6 加速度応答スペクトル(地点1)

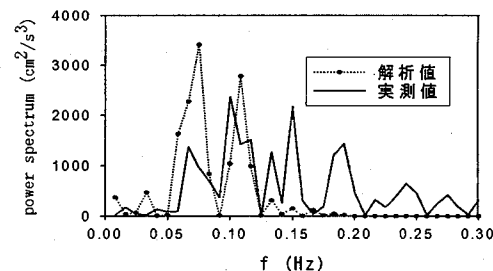


図-7 加速度応答スペクトル(地点2)

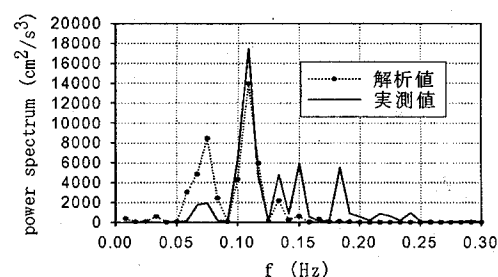


図-8 加速度応答スペクトル(地点5)

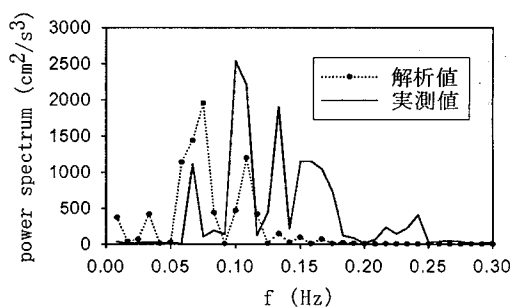


図-9 加速度応答スペクトル(地点7)

ついて求め、次にこの周波数応答関数を用いて、周波数応答のパワースペクトルを次式により求めた。

$$S_i(\omega) = |R_i(\omega)|^2 S_0(\omega) \quad (9)$$

表-4 加速度応答の標準偏差  $\sigma$  (cm/s<sup>2</sup>)

| 地点 | 実測値         |           |             | 解析値   |
|----|-------------|-----------|-------------|-------|
|    | 時刻歴<br>波形より | 有義値<br>より | スペクトル<br>より |       |
| 1  | 16.04       | 14.11     | 19.01       | 19.49 |
| 2  | 17.69       | 15.19     | 12.87       | 11.09 |
| 3  | 9.626       | 8.102     | 11.43       | 9.408 |
| 4  | 12.92       | 10.08     | 16.45       | 17.21 |
| 5  | 15.74       | 12.54     | 21.56       | 19.97 |
| 6  | 12.33       | 9.804     | 17.43       | 14.07 |
| 7  | 8.426       | 6.637     | 11.02       | 8.341 |
| 8  | 11.11       | 9.141     | 12.32       | 13.18 |

ただし、 $S_x(\omega)$ は周波数応答のパワースペクトル、 $R_x(\omega)$ は周波数応答関数（一般に複素関数となる）、 $S_d(\omega)$ は入射波のパワースペクトルである。

今回の実海域計測においては鉛直方向に対する加速度の時刻歴が計測値として与えられているので、このパワースペクトルと上述の周波数応答のパワースペクトルとを比較し検証を行う。加速度計が設置されている8箇所のうち地点1, 2, 5, 7について、解析値および実測値による加速度応答スペクトルを図-6～図-9に示す。また、それぞれの地点の応答スペクトルから求められる加速度応答の標準偏差の比較を表-4に示す。ただし、実測値については時刻歴波形の有義値(ゼロアップクロス法による)から求まる標準偏差も共に示す。これより、地点1, 5については卓越成分の振動数が解析値、観測値とも0.1Hz付近であり、比較的良好な結果といえる。地点2, 7などは実際の応答の方がより高周波成分が含まれており正確な評価ができなかった。しかし、実海域計測データとの比較としては、ほぼ妥当な結果が得られたと考えられる。

#### 4. 水平方向の動揺解析

##### 4.1 はじめに

本節では水平方向の動揺に対して時刻歴応答解析を行う<sup>9)</sup>。ここで、対象構造物のようなポンツーン型浮体構造物は浮体高さに比べて、浮体長さや浮体幅が大きく、水平方向の剛性は相対的に高いため、本節では浮体を剛体として取り扱う。

##### 4.2 解析手法

###### (1) 運動方程式

流体力に関するメモリー効果を考慮した以下の運動方程式をベースとする。

$$\sum_j \{ (m_j + a_{ij}(\infty)) \ddot{x}_j + \int_0^t L_{ij}(\tau) \dot{x}_j(t-\tau) d\tau \} + G_i(x_i) = F_i(t) \quad (10)$$

$x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$  : 変位、速度、加速度

$m_{ij}$  : 慣性質量

$a_{ij}(\infty)$  : 周波数無限大における付加質量

$L_{ij}(t)$  : メモリー影響関数

$\lambda_{ij}(\omega)$  : 造波減衰係数

$G_i(x_i)$  : 係留反力

$F_i(t)$  : 強制外力

ここでメモリー影響関数  $L_{ij}(t)$  は、 $\lambda_{ij}(\omega)$  のフーリエ逆変換から次式で求めることができる。

$$L_{ij}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \cos \omega \tau \lambda_{ij}(\omega) d\omega \quad (11)$$

また、周波数無限大時の付加質量  $a_{ij}(\infty)$  は、次式において適当な周波数  $\omega$  を設定することによって得られる。

$$a_{ij}(\omega) - a_{ij}(\infty) = -\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \lambda_{ij}(\omega') \frac{d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \quad (12)$$

上式において、適当な  $\omega$  に対して  $a_{ij}(\infty)$  を計算するが、 $\omega$  の広い範囲に対して  $a_{ij}(\infty)$  は一定値が得られることが分かっているため、 $\omega$  の値の選定にはそれ程気を使わなくてよい<sup>9)</sup>。

###### (2) メモリー影響の項の処理方法

時刻  $(t + \Delta t)$  の時のメモリー効果の項を

$$\{H(t + \Delta t)\} = \int_0^{t+\Delta t} [L(\tau)] \{\dot{x}(t + \Delta t - \tau)\} d\tau \quad (13)$$

と表す。ただし、 $[L(\tau)]$  は  $L_{ij}(\tau)$  を成分とするマトリクス、 $\{\dot{x}(t)\}$  は  $\dot{x}_i(t)$  を成分とするベクトル、 $\{H(t)\}$  は  $H_i(t)$  を成分とするベクトルである。今、 $t = N\Delta t$  とおくと、

$$\{H(t + \Delta t)\} = \sum_{k=0}^N \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} [L(\tau)] \{\dot{x}(t + \Delta t - \tau)\} d\tau \quad (14)$$

ここで  $L_{ij}(\tau)$  および  $\dot{x}_j(t + \Delta t - \tau)$  のいずれも、 $\tau = k\Delta t$  から  $\tau = (k+1)\Delta t$  の区間で直線的に変化すると仮定すると

$$\begin{aligned} \{H(t + \Delta t)\} = \Delta t \sum_{k=0}^N \left\{ \frac{1}{3} [L((k+1)\Delta t)] \right. \\ \left. + \frac{1}{6} [L(k\Delta t)] \right\} \{\dot{x}(t + \Delta t - (k+1)\Delta t)\} \\ + \left[ \frac{1}{6} [L((k+1)\Delta t)] + \frac{1}{3} [L(k\Delta t)] \right] \{\dot{x}(t + \Delta t - (k)\Delta t)\} \end{aligned} \quad (15)$$

上式において、 $k=0$  の時のみ未知量  $\{\dot{x}(t + \Delta t)\}$  が式に含まれる。そこで、この場合のみ

$$\{\dot{x}(t + \Delta t)\} \approx \{\dot{x}(t)\} + \Delta t \{\ddot{x}(t)\} \quad (16)$$

の近似計算を行うと、式(15)は次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned}
\{H(t+\Delta t)\} = & \Delta t \left\{ \frac{1}{2}[L(\Delta t)] + \frac{1}{2}[L(0)] \right\} \{\ddot{x}(t)\} \\
& + \Delta t \left\{ \frac{1}{6}[L(\Delta t)] + \frac{1}{3}[L(0)] \right\} \{\ddot{x}(t)\} \\
& + \Delta t \sum_{k=1}^N \left\{ \frac{1}{3}[L(k+1)\Delta t] \right. \\
& \left. + \frac{1}{6}[L(k\Delta t)] \right\} \{\ddot{x}(t+\Delta t-(k+1)\Delta t)\} \\
& + \left\{ \frac{1}{6}[L(k+1)\Delta t] + \frac{1}{3}[L(k\Delta t)] \right\} \{\ddot{x}(t+\Delta t-(k)\Delta t)\}
\end{aligned} \quad (17)$$

上式には、時刻  $t+\Delta t$  における値が含まれないため、収束計算の必要がなく、各タイムステップにおいて一度だけ評価をすればよい。

### (3) 時刻歴応答シミュレーション

式(10)の運動方程式を用い、Newmark- $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )により時刻歴応答シミュレーションを行う。外力  $F(t)$  は時刻歴波形として与えられるものとする。メモリー影響の項を  $H(t)$  とすると、時刻  $t$  における運動方程式は、

$$[m + a(\infty)]\{\ddot{x}(t)\} + \{H(t)\} + \{G(x)\} = \{F(t)\} \quad (18)$$

となるので時刻  $t+\Delta t$  の運動方程式は、

$$[m + a(\infty)]\{\ddot{x}(t+\Delta t)\} + \{H(t+\Delta t)\} + \{G(x)\} = \{F(t+\Delta t)\} \quad (19)$$

となる。既知量を右辺に整理すると、 $t+\Delta t$  秒後の加速度  $\{\ddot{x}(t+\Delta t)\}$  は

$$\{\ddot{x}(t+\Delta t)\} = [m + a(\infty)]^{-1} \left\{ -\{H(t+\Delta t)\} - \{G(x)\} + \{F(t+\Delta t)\} \right\} \quad (20)$$

となり、上式の右辺は全て既知量であるから、これによって時刻  $t+\Delta t$  の加速度  $\{\ddot{x}_j(t+\Delta t)\}$  を求める。さらに、

$$\dot{x}_j(t+\Delta t) = \dot{x}_j(t) + (\Delta t/2)\{\ddot{x}_j(t) + \ddot{x}_j(t+\Delta t)\} \quad (21)$$

$$x_j(t+\Delta t) = x_j(t) + \frac{\Delta t}{1} \dot{x}_j(t) + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{x}_j(t) + \beta(\Delta t)^3 \frac{\ddot{x}_j(t+\Delta t) - \ddot{x}_j(t)}{\Delta t} \quad (22)$$

に代入すれば時刻  $t+\Delta t$  における速度  $\{\dot{x}_j(t+\Delta t)\}$  および変位  $\{x_j(t+\Delta t)\}$  が得られる。ただし、係留反力  $G(x)$  は必要に応じて  $t+\Delta t$  での収束を確認した後に、次ステップに進むものとする。

## 4.3 解析結果および考察

### (1) 流体力解析

時刻歴応答シミュレーションを行うために、周波数無限大時の付加質量、一次強制波力および変動漂流力を求める必要がある。ここで、周波数毎の付加質量、造波減衰係数、一次強制波力の複素振幅については水波 Green

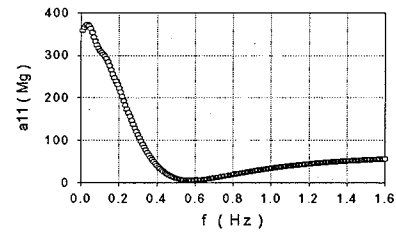


図 - 10 付加質量  $a_{11}$

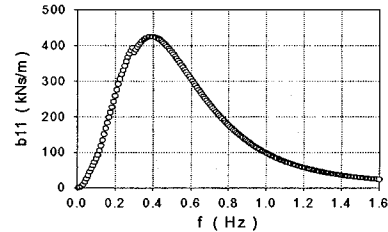


図 - 11 造波減衰係数  $b_{11}$

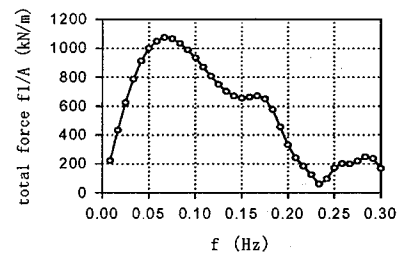


図 - 12 一次強制波力の振幅  $f_1/A$

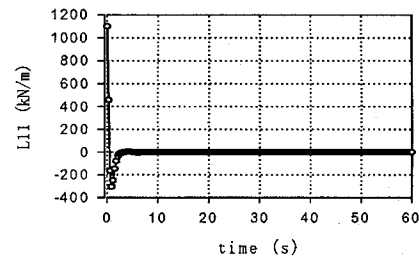


図 - 13 メモリー影響関数  $L_{11}$

関数を用いた境界要素法プログラム<sup>9)</sup>を用いて求めた。図 - 10 に付加質量、図 - 11 に造波減衰係数、図 - 12 に一次強制波力の振幅の surge 方向成分をそれぞれ示す。また、この付加質量、造波減衰係数を用いてメモリー影響関数、周波数無限大時の付加質量を求めた。メモリー影響関数は図 - 13 に示し、周波数無限大時の付加質量は surge, sway, yaw の各モードに対して、それぞれ、 $a_{11}=0.723 \times 10^2 \text{ Mg}$ ,  $a_{22}=0.121 \times 10^3 \text{ Mg}$ ,  $a_{66}=0.126 \times 10^6 \text{ Mg m}^2$  となった。また、慣性質量は  $m_{11}=7.45 \times 10^3 \text{ Mg}$ ,  $m_{22}=7.45 \times 10^3 \text{ Mg}$ ,  $m_{66}=8.631 \times 10^6 \text{ Mg m}^2$  であった。

次に、強制外力として運動方程式に入力される一次強制波力、変動漂流力について検討する。この二つの流体力は時系列の外力として入力するため、上記で算出された周波数領域の一次強制波力から時系列に変換する必要がある。以下にその方法を示す。

### 一次強制波力

今、入射波の時系列波形を次のように級数展開で表現する。

$$\zeta(t) = \sum_{k=1}^N \zeta_k \cos(\omega_k t + \varepsilon_k) \quad (23)$$

この時、同じ入射波に対応した一次強制波力の時系列は、

$$F(t) = \sum_{k=1}^N \operatorname{Re}[\zeta_k X_k(\omega_k) e^{i(\omega_k t + \varepsilon_k)}] \quad (24)$$

のように変換できる。ただし、 $X_k(\omega_k)$ は単位入射波振幅あたりの一次強制波力の複素振幅である。

### 変動波漂流力

変動波漂流力の発生法としては島田法<sup>10)</sup>として知られている次式を用いた。

$$F_y = -\frac{1}{2} \rho g L \sum_i \sum_j \zeta_i \zeta_j S_i S_j \sin \theta_i \sin \theta_j \times P_y \cos((\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j) + \frac{1}{2} B b_y) \quad (25)$$

$$S_i = \sqrt{1 + \frac{2k_i h}{\sinh(2k_i h)}}$$

$$a_y = k_i \cos \theta_i - k_j \cos \theta_j$$

$$b_y = k_i \sin \theta_i - k_j \sin \theta_j$$

$$P_y = \frac{\sin(a_y L/2)}{a_y L/2}$$

$\zeta$  : 波振幅                       $\varepsilon$  : 位相

$\omega$  : 角周波数                   $k$  : 波数

$B$  : y 方向の浮体長           $L$  : x 方向浮体長

$h$  : 海底深さ                   $\theta$  : 入射波の波向き

同様に、モーメントは次式を用いた<sup>11)</sup>。

$$M_y = -\frac{1}{4} \rho g L^2 \sum_i \sum_j \zeta_i \zeta_j S_i S_j \sin \theta_i \sin \theta_j \times Q_y \cos((\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j) + \frac{1}{2} B b_y) \quad (26)$$

$$Q_y = \frac{\cos(a_y L/2)}{a_y L/2} - \frac{\sin(a_y L/2)}{(a_y L/2)^2}$$

上記の方法で求めた一次強制波力および変動波漂流力の surge 方向成分を図 - 14、図 - 15 に示す。

### (2) 風荷重

風速の鉛直分布および風荷重は、以下の式を採用した。

$$U(t) = U_0(t) \left( \frac{z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (27)$$

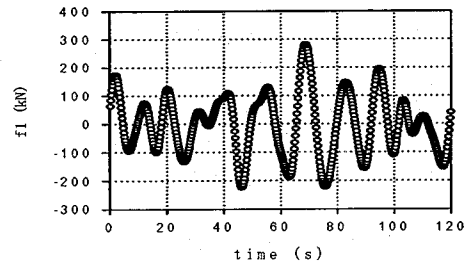


図 - 14 一次強制波力の時刻歴波形

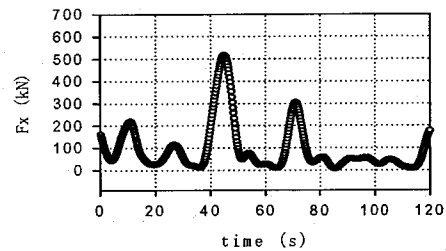


図 - 15 変動波漂流力の時刻歴波形

$$f(t) = \frac{1}{2} C_d \rho S U(t)^2 \quad (28)$$

ただし、 $U(t)$ は高さ  $z$  における風速、 $Z_0$ は基準高さ、 $U_0$ は基準高さにおける風速、 $f(t)$ は風荷重、 $C_d$ は抗力係数、 $\rho$ は空気密度、 $S$ は投影面積である。今回の実海域計測においては、高さ 8(m) の地点に風速計が設置されているので、その地点を基準とした。風荷重は、浮体上に設置されている計測所およびポンツーン側面部分に風圧力が作用するとし、それぞれの抗力係数を 2.0 および 1.0 とした<sup>12)</sup>。

### (3) 係留反力特性

係留フェンダーのヒステリシスを含む非線形性を考慮した解析を行った。係留反力は、変位-反力特性に基づき節点変位  $x$  から求められるが、その変位  $x$  は時刻  $t + \Delta t$  における値でなければならない。そのため、各タイムステップで収束計算を行っている。ここでフェンダーの反力特性を図 - 16 および図 - 17 に示す。図 - 2 におけるフェンダー④および⑥が SUC1000H (高さ 1000mm)、その他が SUC1600H (高さ 1600mm) である。

### (4) 時刻歴応答解析結果および考察

係留フェンダーのヒステリシスを含む非線形性を考慮した時刻歴応答の解析結果を図 - 18 および図 - 19 に示す。同時に実測されたそれぞれの応答の波形も合わせて表示した。この時、計測機器のオフセットにより基線のずれが生じているため、基線の補正を行った。さらに、漂流力、一次強制波力、風荷重の影響、フェンダークリアランスによる影響の比較検討のため、それぞれの解析結果を図 - 20～図 - 24 に示す。ただし、クリアランスの比較により surge 方向においては 6cm、sway 方向においては 14cm 程度が妥当であったのでそれらを基本とした。なお、設計値はいずれも 10cm (管理値は  $10 \pm 2$ cm) であるが、

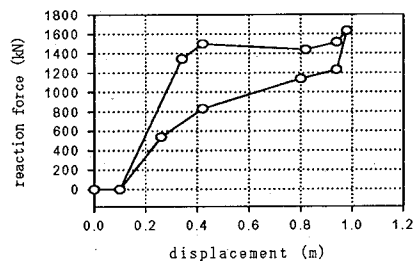


図 - 16 フェンダーSUC1600H の反力特性

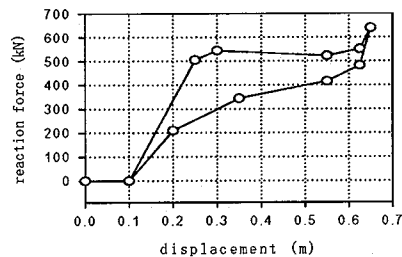


図 - 17 フェンダーSUC1000H の反力特性

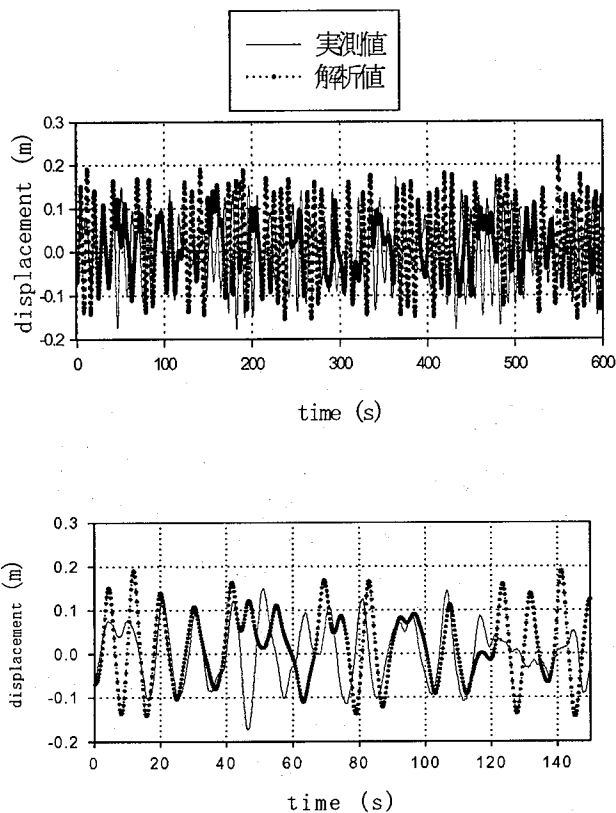


図 - 18 surge 運動の時刻歴波形  
(上段：600 秒間，下段：150 秒間)

浮体の温度変形や受衝板の重さにもなる変形，繰り返し载荷にもなるフェンダーのクリープ等により，全体として最大±4cm 程度の変化は生じ得ると考えられる。また，ゼロアップクロス法により求めた有義値を表 - 5 に示す。なお，線形バネに対して算出された固有周期は surge, sway, yaw において，7.10s, 7.95s, 4.84s であった。

この結果から surge, sway においては概ね妥当な結果が得られた。しかし，yaw に関しては表 - 5 より実測値と解析値に誤差が生じた。これは入射波を一方向波と仮定し

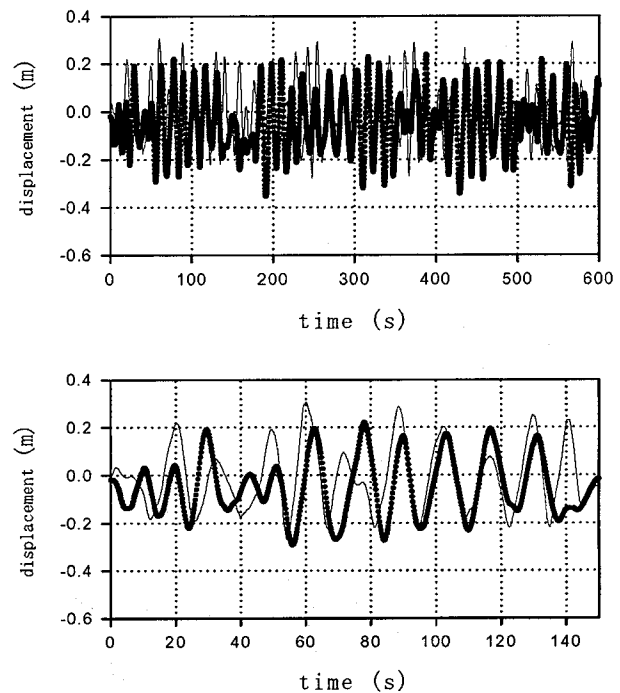


図 - 19 sway 運動の時刻歴波形  
(上段：600 秒間，下段：150 秒間)

表 - 5 時刻歴波形の有義値

| 有義値(片振幅)     | surge(m) | sway(m) | yaw(rad) |
|--------------|----------|---------|----------|
| 実測値          | 0.281    | 0.481   | 0.00897  |
| クリアランス 6cm   | 0.300    | 0.271   | 0.00427  |
| クリアランス 10cm  | 0.443    | 0.364   | 0.00566  |
| クリアランス 14cm  | 0.570    | 0.478   | 0.00692  |
| 入射波の波向き 135° | 0.298    | 0.515   | 0.00714  |

| 有義波周期        | surge(s) | sway(s) | yaw(s) |
|--------------|----------|---------|--------|
| 実測値          | 15.2     | 18.9    | 14.3   |
| クリアランス 6cm   | 16.4     | 14.8    | 8.76   |
| クリアランス 10cm  | 16.4     | 16.7    | 9.80   |
| クリアランス 14cm  | 20.4     | 17.7    | 10.4   |
| 入射波の波向き 135° | 14.1     | 21.7    | 11.2   |

ているため，現実の多方向波による強制波力モーメントを十分に考慮できていないことがもっとも大きな原因と考えられる。本研究では一方向波としての代表波向きを 150° としたが，実海域での多方向波においては y 方向成分の波力がより強く出ていたことが推測される。仮に代表波向きを 135° とした解析結果では，surge の有義値は小さくなり，sway は大きくなった。この結果からも多方向波を考慮できなかったことが，誤差の大きな原因となっていたと考えられる。

外力として漂流力のみを考慮した解析結果において，surge では基線が x 軸の負の方向にわずかにあらわれ，sway では y 軸の正の方向にわずかにあらわれている。また，一次強制波力のみを考慮した解析結果においては surge, sway とともに基線が横軸に近づいていることから，計測機器のオフセットに加えて，波漂流力による基線のずれも実測値には含まれている。ただし，今回の計測ではこれらの分離は行っていない。また，風荷重を考慮したものと，いないものとの比較により風荷重による影響は少なかったことが分かる。ドルフィンとフェンダーの

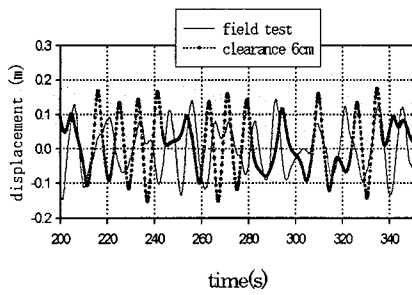


図 - 20 クリアランス 6cm における surge 運動の時刻歴波形

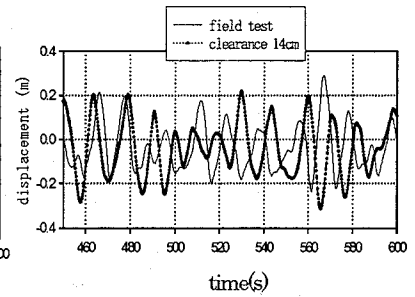
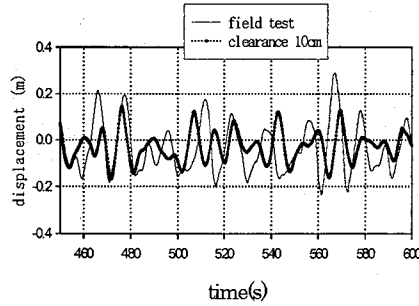


図 - 21 クリアランス 10cm, 14cm における sway 運動の時刻歴波形

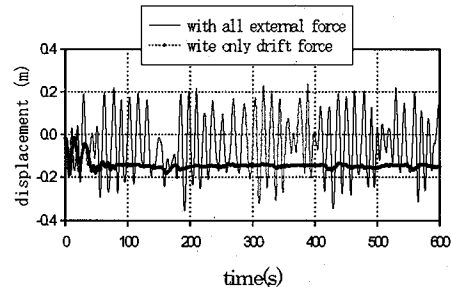
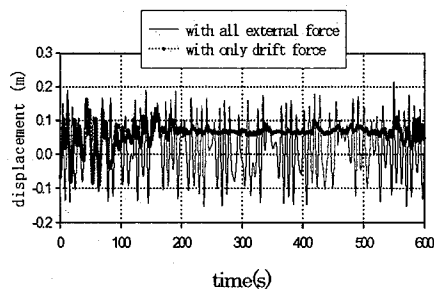


図 - 22 漂流力のみを考慮した時の surge,sway 運動の時刻歴波形

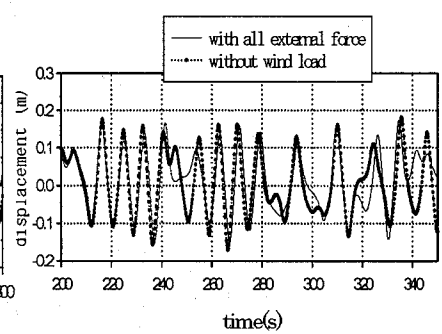
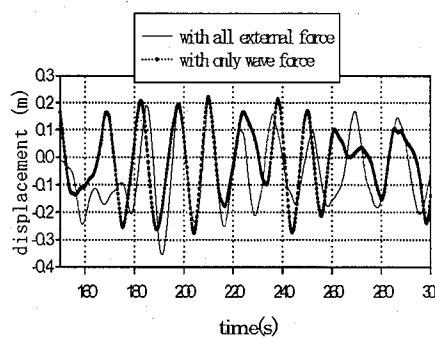
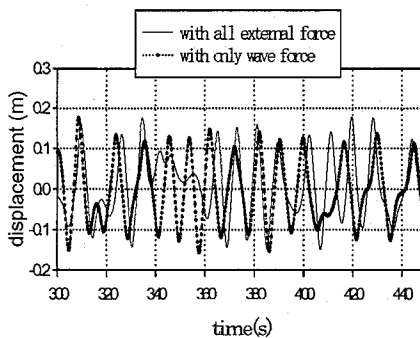


図 - 23 一次強制波力のみを考慮した時の surge,sway 運動の時刻歴波形

図 - 24 風荷重を考慮しない時の surge 運動の時刻歴波形

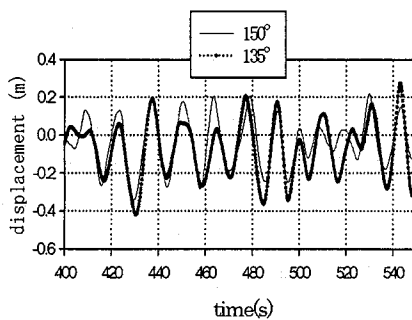


図 - 25 入射波方向を変化させた時の sway 運動の時刻歴波形

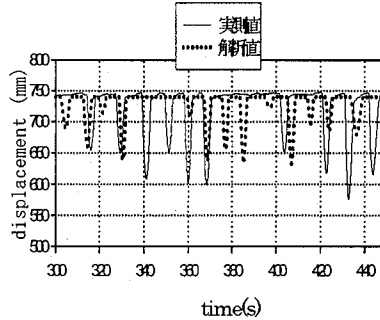


図 - 26 フェンダー a の変位の時刻歴波形

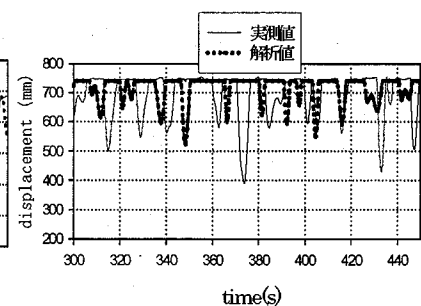


図 - 27 フェンダー 4 の変位の時刻歴波形



クリアランスについては、図 - 20、図 - 21 および表 - 5 より surge 方向について 6cm, sway 方向について 14cm 程度が妥当であったと本研究からは推測されるが、135° の解析結果から実際の sway 方向のクリアランスはより小さいと考えられる。また、解析結果によるフェンダー変位をフェンダー変位計で得られた計測値と共に図 - 26 および図 - 27 に示す。この結果においても surge, sway の時刻歴波形と同様、変位は概ね妥当と考えられるが位相を含めて一致するまでには至っていない。

## 5. 結論

本研究において、実海域に設置された浮体構造物を対象として以下のことを行った。

- ・ 鉛直方向の周波数領域における弾性応答解析
- ・ 水平方向における係留フェンダーのヒステリシスを含んだ非線形性を考慮した時刻歴応答シミュレーション

実測結果と解析結果の比較を行ったところ、鉛直方向においては誤差があるものの概ね妥当な応答が得られた。水平方向においても surge, sway においては概ね妥当な結果が得られたが、yaw に関しては誤差が生じた。これらの誤差については、入射波の波向きを 1 方向で考えていることが最も大きな原因であると考えられる。今後の課題としては、不規則波の多方向性の考慮、海底地形の考慮などが挙げられる。

なお本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号：17360212、研究代表者：宇都宮智昭)より補助を受けた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 国土交通省海事局技術課、海上技術安全研究所：メガフロート情報基地機能実証実験報告書, 2002.
- 2) 橋本典明, 永井紀彦, 浅井正, 菅原一晃, 朴慶寿: 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について, 港湾技術研究所報告, 第 32 巻, 第 1 号, pp.27-51, 1993.
- 3) 小舟浩治, 合田良実, 成田明, 佐々木弘, 森田行司: 現地観測における水圧波形から表面波への換算法について, 港湾技術研究所報告, 第 27 巻, 第 3 号, pp.161-183, 1988.
- 4) Utsunomiya, T., Watanabe, E. and Eatock Taylor, R.: Wave response analysis of a box-like VLFS close to a breakwater, Proc. 17th Int. Conf. Offshore Mech. Arctic Eng., No. 4331, 1998.
- 5) Utsunomiya, T. and Watanabe, E.: Wave response analysis of hybrid-type VLFS by accelerated BEM, Hydroelasticity in Marine Technology, pp. 297-303, 2003
- 6) 渡邊英一, 宇都宮智昭, 岡藤孝史, 村越潤, 麓興一郎: 浮体橋の波浪応答シミュレーションプログラムの開発, 構造工学論文集, Vol.49A, pp. 661-668, 2003.
- 7) 京都大学, (独)土木研究所, (株)建設技術研究所: 浮体橋の波浪・風作用下での動揺解析手法の開発(報告書), 2002.
- 8) 遠藤久芳, 矢後清和: 動荷重を受ける大型浮体の時刻歴応答, 日本造船学会論文集, 第 186 号, pp. 369-376, 1999.
- 9) 渡邊英一, 宇都宮智昭, 川辺俊輔: 非正則周波数の除去された波浪回折・発散問題のための高次境界要素法, 計算工学講演会論文集, Vol.7, pp. 385-388, 2002.
- 10) 島田潔, 丸山文生: メガフロートに作用する変動波漂流力の特性について, 日本造船学会論文集, 第 190 号, pp. 347-351, 2001.
- 11) 島田潔, 丸山文生: メガフロートに作用する変動波漂流力モーメントの特性について, 日本造船学会論文集, 第 192 号, pp. 319-323, 2002.
- 12) (社)日本鋼構造協会編: 構造物の耐風工学, 東京電機出版会, 1997.

(2006 年 4 月 13 日 受付)