

# 洋上風力発電のための円筒型浮体基礎の 不規則波浪動揺実験

## IRREGULAR WAVE EXPERIMENT ON MOTION OF FLOATING FOUNDATIONS OF CYLINDRICAL SHAPE FOR OFFSHORE WIND TURBINE

西田瑛太郎<sup>1</sup>・宇都宮智昭<sup>2</sup>・佐藤郁<sup>3</sup>

Eitaro NISHIDA, Tomoaki UTSUNOMIYA and Iku SATO

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

<sup>3</sup>正会員 工博 戸田建設(株) アーバン・ルネッサンス部 (〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1)

It is strongly desired to develop a cost-effective wind turbine system of floating-type in order to gain the renewable energy resources. In this study, the SPAR-type floating foundations using reinforced concrete are examined. The regular and irregular wave experiments are performed for 1/100 scale models of the prototypes. Three models are examined, that is, a uniform cylinder moored at the gravity center, a uniform cylinder moored at the upper position and a stepped-type floating cylinder moored at the upper position. The experimental results are compared with numerical predictions using potential theory and Morison's equation. The stepped-type floating cylinder moored at the upper position has shown smaller motions than the uniform cylinders.

**Key Words :** Floating body, offshore wind turbine, spar, irregular wave, Morison's equation

### 1. はじめに

浮体式洋上風力発電の実現に向けて、国内外で検討が進められているが<sup>1)~6)</sup>、技術的課題の解決に加えて建設コスト低減も大きな課題である。本研究では、コスト競争力に優れると考えられるコンクリート製の円筒型浮体基礎に着目し、その波浪動揺特性を実験的に調査するとともに、モリソン式による波浪動揺予測プログラムを開発・検証することを目的とする。既存の研究<sup>7)</sup>では、二段円筒型浮体の風・波・潮流作用時の動揺特性について調査しているが、規則波に対する実験のみで、不規則波に対する実験は行われていない。緩係留浮体に不規則波が作用する時には、長周期動揺等、規則波に対する応答の重ね合わせのみでは必ずしも十分に予測できない現象が発現することもあり、不規則波に対する実験も不可欠と考えられる。そこで本研究では規則波実験に加えて不規則波実験をおこない、単純円筒型および二段円筒型浮体基礎の波浪動揺特性について調査する。また、単純円筒型浮体基礎において、係留索の取り付け位置を重心位置および浮体上部としたものの2種類に対して実験をおこない、係留索取り付け位置の違いによる波浪動揺特性への影響についてもあわせて調査する。

### 2. 動揺解析手法について

#### (1) 波力の評価式

一般に、 $D/\lambda < 0.2$  (波長 $\lambda$ , 円柱の直径 $D$ ) の時、鉛直円柱に作用する水平波力はモリソン式により評価できる<sup>8)</sup>。本実験はその範囲内となるため、基本的にモリソン式により波力を評価し、単純円筒型浮体の規則波応答に関してはポテンシャル理論との比較もあわせておこなう。運動する細長部材に使えるように修正されたモリソン式は次式により表される。

$$dF_x = \rho \frac{\pi D^2}{4} dz \frac{\partial u}{\partial t} + C_a \rho \frac{\pi D^2}{4} dz \left( \frac{\partial u}{\partial t} - \dot{u}_h \right) + C_d \frac{\rho}{2} D dz |u - u_h| (u - u_h) \quad (1)$$

ここで、 $dF_x$ は部材の微小長さ $dz$ に作用する水平波力、 $\rho$ は流体密度、 $D$ は円柱直径、 $C_a$ は円柱の付加質量係数、 $C_d$ は円柱の抗力係数、 $u$ は部材中心軸位置における水平方向の水粒子速度、 $u_h$ は部材の移動速度の水平方向成分である。上式の右辺第3項は抗力項で、浮体部材の移動速度に依存することから、流体力による減衰効果が発生することが分かる。

鉛直方向に作用する波力もモリソン式に準じて、浮体による波の変形を無視して評価する。単純円筒型浮体に対しては次式を、

$$F_z = \frac{\pi D^2}{4} p(-d) + a_{33} \left( \frac{\partial w}{\partial t} - \dot{u}_v \right) \quad (2)$$

$$+ C_{dv} \frac{\rho \pi D^2}{2 \cdot 4} |w - u_v| (w - u_v) \\ a_{33} = C_{av} \frac{4}{3} \rho \left( \frac{D}{2} \right)^3 \quad (3)$$

二段円筒型浮体に対しては次式を用いる.

$$F_z = \frac{\pi D_2^2}{4} p(-d) - \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4} p(-d') \\ + a_{33}' \left( \frac{\partial w}{\partial t} - \dot{u}_v \right) + C_{dv} \frac{\rho \pi D_2^2}{2 \cdot 4} |w - u_v| (w - u_v) \quad (4)$$

$$+ C_{dv} \frac{\rho \pi(D_2^2 - D_1^2)}{2 \cdot 4} |w' - u_v| (w' - u_v) \\ a_{33}' = C_{av}' \frac{8}{3} \rho \left( \frac{D_2}{2} \right)^3 \quad (5)$$

ここで、 $p(z)$  は浮体中心軸上の高さ  $z$  (静水面から鉛直上向きを正とする) において作用する動水圧、 $d$  は喫水、 $d'$ 、 $D_1$ 、 $D_2$  はそれぞれ二段円筒型浮体における水面から段違い部までの深さ、上部円筒直径、下部円筒直径 ( $D_1 < D_2$  とする) である。また、 $a_{33}$  および  $a_{33}'$  は単純円筒型浮体および二段円筒型浮体の鉛直方向の付加質量<sup>8)</sup>、 $C_{av}$  および  $C_{av}'$  は鉛直方向の付加質量係数、 $C_{dv}$  は鉛直方向の抗力係数、 $w$  は浮体底面における鉛直方向の水粒子の速度、 $w'$  は二段円筒型浮体の段違い部における鉛直方向の水粒子の速度、 $u_v$  は浮体の移動速度の鉛直方向成分である。

なお、浮体上部が完全没水したときは、静水面から浮体上部までの深さを  $h_w$  として、次式により表される圧力  $p_w(-h_w)$  を浮体上部に作用させる。

$$p_w(-h_w) = \rho g h_w + p(-h_w) \quad (6)$$

また、二段円筒型浮体において、段違い部が水面上に現れる際には、波力式を式(2)による評価に切り替えればよいが、今回の実験の範囲では、これは観測されていない。

## (2) 運動方程式

Surge, Pitch, Heave 方向の重心点まわりの運動方程式を次式により表す。

$$\begin{bmatrix} M + a_{11} & a_{15} & 0 \\ a_{51} & Mr^2 + a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & M + a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_5 \\ \ddot{\xi}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{15} & 0 \\ b_{51} & b_{55} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_5 \\ \dot{\xi}_3 \end{bmatrix} \quad (7) \\ + \begin{bmatrix} K_H & K_H l & 0 \\ K_H l & Mg \overline{GM} + K_H l^2 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_5 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_5 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

ここで、 $\xi_1$  : Surge 方向変位、 $\xi_3$  : Heave 方向変位、 $\xi_5$  : Pitch 方向変位、 $a_{ij}$  : 付加質量、 $b_{ij}$  : 造波減衰係数、 $F_i$  : 強制波力、 $M$  : 浮体質量、 $r$  : 慣動半径、 $K_H$  : 線形係留バネ係数、 $l$  : 重心から係留取付位置までの距離、 $\overline{GM}$  : メタセンター高さ、 $g$  : 重力加速度、 $A$  : 水線面積である。

ポテンシャル理論により、 $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$  および  $F_i$  が周波数の関数として求められるので、式(7)を周波数領域で解くことで、周波数応答関数が得られる。これは、規則波実験の結果と直接、比較できる。

一方、モリソン式により波力を評価する場合は、造波成分の項は考えないので、左辺第2項は0となる。規則波応答を算出する際は、波の速度、加速度、圧力を微小振幅波理論および有限振幅波理論(Stokes の2次理論)<sup>8)</sup>により算出し、式(1)、式(2)、式(4)にそれらを代入して、強制波力を求める。なお、付加質量に相当する項は左辺に移動する。ここで運動方程式は、Newmark- $\beta$ 法( $\beta = 0.25$ )を用いて時間領域で解く。

不規則波に対する応答は、以下の手順で求められる。まず波高計から得られた水位の時刻歴データ  $\eta(t)$  をフーリエ解析し、振幅  $a_k$ 、角周波数  $\omega_k$  および位相  $\theta_k$  を有する規則波の重ね合わせで表現する。

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \quad (8)$$

この時、高さ  $z$  における水粒子の水平速度  $u$  および水平加速度  $\partial u / \partial t$  は次式で求められる。

$$u = \sum_{k=1}^N a_k \omega_k \frac{\cosh \kappa_k (z+h)}{\sinh \kappa_k h} \cos(\omega_k t + \theta_k - \kappa_k L) \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{k=1}^N -a_k \omega_k^2 \frac{\cosh \kappa_k (z+h)}{\sinh \kappa_k h} \sin(\omega_k t + \theta_k - \kappa_k L) \quad (10)$$

ここで、 $h$ 、 $\kappa_k$ 、 $L$  はそれぞれ水深、角周波数  $\omega_k$  の波の波数、波高計設置位置から浮体軸中心位置までの波の進行方向に沿った水平距離である。同様にして水粒子の鉛直速度、鉛直加速度および動水圧が求められ、式(1)、式(2)、式(4)に代入することで、不規則波に対する強制波力が求められる。

また、不規則波応答については、係留系の非線形反力特性を考慮した解析も実施する。この場合、線形バネ係数  $K_H = 0$  とした上で、浮体運動変位に対応して求められる係留力<sup>9)</sup>を式(7)の右辺において考慮する。

## 3. 実験方法

2MW クラスの水平軸型3翼風車を搭載する想定実機を対象として、その100分の1スケールの単純円



筒型、二段円筒型模型浮体を製作した。模型浮体の諸元を表-1 および表-2 に、模型浮体の概要図を図-1～図-3 に示す。単純円筒型模型浮体においては、係留取付位置を重心位置および水面近くとした2つのモデルに対して実験を行った。この際、単純円筒型係留下モデルの係留のアンカー位置は浮体中心から長さ方向に 120cm、幅方向に 40cm、係留長さ 140cm とし、単純円筒型係留上モデルはそれぞれ、150cm、40cm、190cm とした。二段円筒型模型浮体は後者と同じ係留条件とした。

2次元造波水槽（長さ 30m、幅 0.8m、水深 0.75m）を用いて、規則波および不規則波に対する波浪動揺実験を行った。それぞれの入射波条件を表-3 および表-4 に示す。

表-1 単純円筒型模型浮体の諸元

|                  | 単純円筒型<br>係留下モデル               | 単純円筒型<br>係留上モデル              |
|------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 全高               | 64.0cm                        | 64.0cm                       |
| 喫水 $d$           | 60.0cm                        | 60.0cm                       |
| 乾舷               | 4.0cm                         | 4.0cm                        |
| 外直径 $D$          | 8.9cm                         | 8.9cm                        |
| 排水重量             | 36.58N                        | 36.58N                       |
| 重心高さ $KG$        | 24.8cm                        | 24.8cm                       |
| メタセンター高さ<br>$GM$ | 5.28cm                        | 5.28cm                       |
| 慣動半径 $r$         | 27.7cm                        | 27.3cm                       |
| 係留バネ係数 $K_H$     | $19.2 \times 10^{-3}$<br>N/cm | $9.7 \times 10^{-3}$<br>N/cm |
| 係留取付位置<br>(底面から) | 24.8cm                        | 56.0cm                       |
| Surge 固有周期       | 12.4s                         | 17.4s                        |
| Heave 固有周期       | 1.6s                          | 1.6s                         |
| Pitch 固有周期       | 2.9s                          | 2.8s                         |

表-2 二段円筒型模型浮体の諸元

|                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| 全高               | 64.0cm                       |
| 上部高さ             | 16.0cm                       |
| 下部高さ             | 48.0cm                       |
| 喫水 $d$           | 60.0cm                       |
| 乾舷               | 4.0cm                        |
| 上部直径 $D_1$       | 4.8cm                        |
| 下部直径 $D_2$       | 8.9cm                        |
| 排水重量             | 31.57N                       |
| 重心高さ $KG$        | 24.8cm                       |
| メタセンター高さ<br>$GM$ | 2.86cm                       |
| 慣動半径 $r$         | 29.8cm                       |
| 係留バネ係数 $K_H$     | $9.0 \times 10^{-3}$<br>N/cm |
| 係留取付位置<br>(底面から) | 56.0cm                       |
| Surge 固有周期       | 16.8s                        |
| Heave 固有周期       | 2.7s                         |
| Pitch 固有周期       | 5.4s                         |

それぞれの条件のもとで波高、浮体模型の動揺量を計測した。浮体模型の動揺に関しては、水路側面からビデオ撮影し、画像解析によって動揺量を時系列で計測した。サンプリング数は規則波に対しては、(64 点/波長)×100 波とし、不規則波に対しては、(64 点/s)×300s とした。

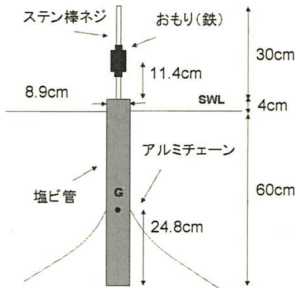


図-1 単純円筒型係留下模型浮体

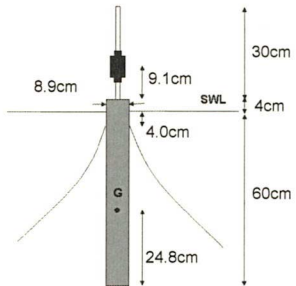


図-2 単純円筒型係留上模型浮体

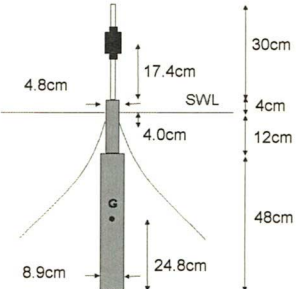


図-3 二段円筒型模型浮体

表-3 規則波に対する入射波条件

| 実物スケール   |       | 模型スケール   |       |
|----------|-------|----------|-------|
| 波高(m)    | 周期(s) | 波高(cm)   | 周期(s) |
| 3.0, 6.0 | 7.5   | 3.0, 6.0 | 0.75  |
|          | 10.0  |          | 1.00  |
|          | 12.5  |          | 1.25  |
|          | 15.0  |          | 1.50  |
|          | 17.5  |          | 1.75  |
|          | 20.0  |          | 2.00  |

表-4 不規則波に対する入射波条件

|             | 実機スケール      |             |              | 模型スケール       |              |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
|             | 風速<br>(m/s) | 有義波<br>高(m) | 有義波<br>周期(s) | 有義波<br>高(cm) | 有義波<br>周期(s) |
| 定格時         | 13          | 3.9         | 7.4          | 3.9          | 0.74         |
| カットア<br>ウト時 | 25          | 7.1         | 9.8          | 7.1          | 0.98         |
| 暴風時         | 50          | 12.0        | 13.4         | 12.0         | 1.34         |

#### 4. 実験結果と解析結果の比較及び考察

##### (1) 単純円筒型模型浮体

図-4～図-6 に規則波に対する単純円筒型係留上モデルの波浪応答倍率の実験結果と解析結果を示す。なお、横軸は波の周期、縦軸は波浪応答倍率（単位振幅波あたりの応答変位値）である。また、モリソン式における各係数は、 $C_a=1.0$ ， $C_d=1.0$ ， $C_{av}=1.6$ ， $C_{dv}=5.0$  とし、 $C_{av}$  の設定に関しては文献<sup>8)</sup>を参考にした。なお、係留下モデルの波浪応答倍率の結果は、Surge および Heave は図-4、図-5 とほぼ完全に一致し、Pitch については、固有周期が少し異なることを反映して、係留下モデルの波浪応答倍率の方が図-6 よりも少し小さくなっている。

Surge および Pitch 応答に関してはモリソン式、ポテンシャル理論のいずれも、実験値をよく再現している。一方、図-5 において、入射波高 6.0cm 時には Heave 共振時に浮体は一時的に完全没水するが、ポテンシャル理論ではこの完全没水の効果および造渦減衰の効果を考慮していないため、Heave 共振時において過大評価となっている。一方、これらを考慮したモリソン式では、実験値をよく再現できている。また、モリソン式において Stokes 2 次理論による評価もおこなっているが、Airy 波理論による結果との差はみられなかった。

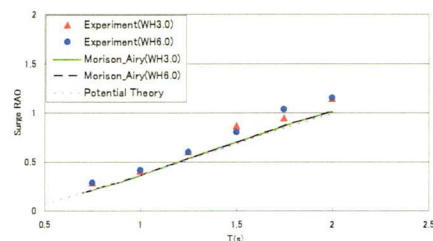


図-4 単純円筒型係留上モデルのSurge波浪応答倍率

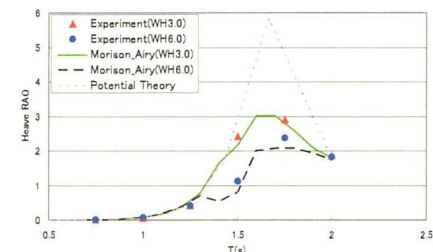


図-5 単純円筒型係留上モデルのHeave波浪応答倍率

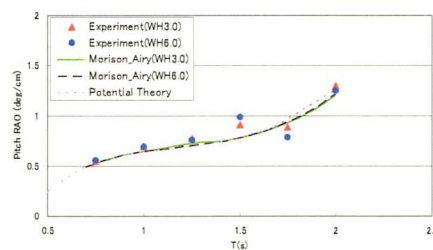


図-6 単純円筒型係留上モデルのPitch波浪応答倍率

表-5 定格時の応答変位の有義値 不規則波実験及び解析結果

|            | 単純円筒型係留下   |         |         |           | 単純円筒型係留上   |         |         |           | 二段円筒型      |         |         |           |
|------------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|
|            | Experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | Experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | Experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear |
| Surge(cm)  | 1.07(2.74) | 0.95    | 0.95    | 0.94      | 1.30(3.97) | 0.77    | 0.76    | 0.73      | 1.17(3.03) | 0.60    | 0.58    | 0.57      |
| Heave(cm)  | 0.33(0.73) | 0.58    | 0.48    | 0.48      | 0.27(0.50) | 0.84    | 0.57    | 0.57      | 0.41(1.02) | 0.76    | 0.45    | 0.45      |
| Pitch(deg) | 1.83(3.66) | 3.30    | 3.30    | 3.29      | 1.68(4.18) | 3.56    | 3.51    | 3.85      | 0.96(3.05) | 1.49    | 1.45    | 1.33      |

表-6 定格時の応答変位の有義周期 不規則波実験及び解析結果

|           | 単純円筒型係留下   |         |         |           | 単純円筒型係留上   |         |         |           | 二段円筒型      |         |         |           |
|-----------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|
|           | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear |
| Surge(s)  | 6.19       | 5.57    | 5.57    | 5.74      | 6.82       | 4.66    | 4.59    | 4.25      | 10.81      | 4.15    | 3.85    | 3.52      |
| Heaves(s) | 1.91       | 1.82    | 1.84    | 1.84      | 1.97       | 1.75    | 1.84    | 1.84      | 2.44       | 2.92    | 2.82    | 2.82      |
| Pitch(s)  | 2.67       | 2.97    | 2.97    | 2.97      | 2.15       | 2.98    | 2.98    | 2.96      | 4.22       | 5.20    | 5.18    | 4.98      |

表-7 カットアウト時の応答変位の有義値 不規則波実験及び解析結果

|            | 単純円筒型係留下    |         |         |           | 単純円筒型係留上    |         |         |           | 二段円筒型      |         |         |           |
|------------|-------------|---------|---------|-----------|-------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|
|            | Experiment  | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | Experiment  | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | Experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear |
| Surge(cm)  | 1.99(4.57)  | 2.58    | 2.34    | 2.33      | 2.26(6.30)  | 2.35    | 2.17    | 2.16      | 2.48(5.78) | 1.91    | 2.09    | 2.06      |
| Heave(cm)  | 2.61(4.62)  | 4.43    | 2.88    | 2.88      | 2.43(4.23)  | 4.54    | 2.93    | 2.93      | 0.83(1.85) | 1.40    | 0.94    | 0.94      |
| Pitch(deg) | 9.69(16.50) | 9.09    | 7.49    | 7.56      | 7.29(11.12) | 8.87    | 7.82    | 7.79      | 1.92(4.86) | 2.21    | 2.01    | 2.03      |

表-8 カットアウト時の応答変位の有義周期 不規則波実験及び解析結果

|          | 単純円筒型係留下   |         |         |           | 単純円筒型係留上   |         |         |           | 二段円筒型      |         |         |           |
|----------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|
|          | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear |
| Surge(s) | 2.78       | 6.19    | 5.39    | 5.38      | 4.74       | 5.20    | 4.97    | 4.57      | 7.89       | 5.12    | 6.09    | 5.78      |
| Heave(s) | 1.82       | 1.78    | 1.92    | 1.92      | 1.77       | 1.87    | 1.95    | 1.95      | 1.84       | 2.99    | 2.30    | 2.30      |
| Pitch(s) | 3.09       | 3.22    | 3.13    | 3.12      | 3.12       | 3.13    | 3.08    | 3.02      | 5.12       | 4.03    | 3.63    | 3.52      |

表-9 暴風時の応答変位の有義値 不規則波実験及び解析結果

|            | 単純円筒型係留下     |         |         |           | 単純円筒型係留上     |         |         |           | 二段円筒型       |         |         |           |
|------------|--------------|---------|---------|-----------|--------------|---------|---------|-----------|-------------|---------|---------|-----------|
|            | Experiment   | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | Experiment   | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | Experiment  | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear |
| Surge(cm)  | 4.85(10.92)  | 6.94    | 5.53    | 5.95      | 5.68(12.46)  | 8.78    | 6.61    | 5.82      | 6.62(13.30) | 5.32    | 5.20    | 5.05      |
| Heave(cm)  | 6.37(11.20)  | 8.38    | 5.66    | 5.66      | 6.14(11.40)  | 9.26    | 5.80    | 5.80      | 1.50(3.68)  | 4.42    | 2.34    | 2.34      |
| Pitch(deg) | 16.46(30.34) | 16.12   | 15.36   | 14.83     | 11.76(20.38) | 16.52   | 15.41   | 15.70     | 4.22(9.47)  | 5.80    | 3.56    | 3.66      |

表-10 暴風時の応答変位の有義周期 不規則波実験結果及び解析結果

|          | 単純円筒型係留下   |         |         |           | 単純円筒型係留上   |         |         |           | 二段円筒型      |         |         |           |
|----------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|
|          | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear | experiment | Cdv=1.0 | Cdv=5.0 | nonlinear |
| Surge(s) | 3.32       | 9.07    | 5.63    | 4.38      | 6.57       | 16.31   | 12.08   | 6.58      | 8.97       | 5.96    | 6.06    | 5.49      |
| Heave(s) | 2.36       | 2.01    | 2.38    | 2.38      | 2.34       | 1.90    | 2.33    | 2.33      | 2.13       | 3.41    | 3.05    | 3.05      |
| Pitch(s) | 3.36       | 3.45    | 3.28    | 3.29      | 3.26       | 3.33    | 3.27    | 3.17      | 8.27       | 4.65    | 4.14    | 4.31      |



定格時、カットアウト時、暴風時のそれぞれに対する応答変位の有義値、有義周期の実験結果及び解析結果を表-5～表-10に示す。応答変位の有義値は片振幅の値とし、ゼロアップクロス法を用いて求めた。なお、括弧内の値は片振幅最大値である。

不規則波に対する実験結果は、Surge に関しては、係留下モデルに比べて係留上モデルで、表-5、表-7、表-9のいずれの条件下でも応答変位の有義値が大きくなっている。この原因は、図-4において Surge の応答倍率は周期とともに増加する傾向があるため、動揺周期の長い係留上モデルにおいて Surge 動揺量が大きくなったものと推測される。Heave に関しては、3条件時で係留下モデルに比べて係留上モデルで応答変位の有義値がわずかに小さくなっている。これは、係留上モデルの係留索の長さが係留下モデルの長さより長いことにより、係留索に作用する減衰力が大きくなったためと考えられる。Pitch に関しては、Heave と同様3条件時で、係留下モデルに比べて係留上モデルの応答変位の有義値が小さくなっている。これも Heave の場合と同様に、係留索に作用する減衰力の効果と考えられる。

浮体式洋上風力発電施設においては、Surge、Heave、Pitch の応答の中で、風車およびタワーの設計要件からは Pitch 応答を制限する必要性が高く、以上の実験結果からは、係留索は浮体上部に取付けることが波浪による Pitch 応答の低減に有効であることが分かる。

不規則波に対する解析では、鉛直方向の抗力係数  $C_{dv}$  を 1.0 と 5.0 の2種類に設定して行なった。表-5～表-10において、 $C_{dv}=1.0$  および  $C_{dv}=5.0$  の列は、いずれも係留は線形バネで評価している。また、 $C_{dv}=5.0$  とし、係留系の非線形反力特性を考慮した解析もおこなった。実験結果と比較すると、Heave 応答変位に関して、 $C_{dv}=1.0$  では、実験値に對しかなり過大に評価しているが、 $C_{dv}=5.0$  とすると振幅の有義値が実験結果に近づく。また、Heave 応答変位に関して、周期はおおむね実験値とあっている。

Surge 応答変位に関して、係留の非線形特性を考慮すると、おおむね実験値をとらえられている。一方、係留索の非線形特性を考慮していない場合、暴風時の Surge 応答の有義周期での乖離が大きくなっている場合があり、非線形特性を考慮することの有効性が分かる。

Pitch 応答に関しても、おおむね実験値をとらえられているが、実験値では係留索を上部につけると応答低減しているのが、解析値では十分に再現できておらず、係留索に作用する減衰力を今後、考慮していくことが必要である。

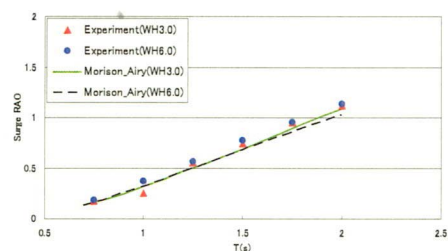


図-7 二段円筒型模型浮体のSurge波浪応答倍率

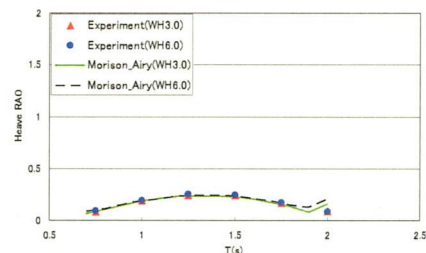


図-8 二段円筒型模型浮体のHeave波浪応答倍率

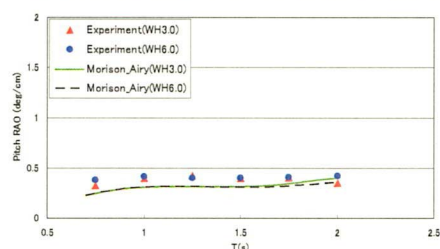


図-9 二段円筒型模型浮体のPitch波浪応答倍率

## (2) 二段円筒型模型浮体

図-7～図-9に規則波に対する二段円筒型模型浮体の Surge、Heave、Pitch の波浪応答倍率の実験結果と解析結果を示す。なお、横軸は波の周期、縦軸は波浪応答倍率（単位振幅波あたりの応答変位値）である。規則波に対する解析結果に関しては、実験結果に概ね合致している。なお、 $C_a=1.0$ 、 $C_d=1.0$ 、 $C_{av}'=2.0$ 、 $C_{dv}=5.0$  とし、 $C_{av}'$  の値に関しては文献<sup>8)</sup>を参考にした。

Heave に関しては、単純円筒型の場合と比べ、応答特性が著しく改善されたことが分かる。また、完全没水せず線形応答となるため、単純円筒型のケースとは違って、波高 3.0cm、波高 6.0cm で値がほぼ一致している。Surge に関しては、波浪応答倍率は単純円筒型の場合と比べてほとんど変化はない。Pitch に関しては、単純円筒型に比べてかなり応答が低減しているが、これは二段円筒型では単純円筒型に比べて、浮体上部での強制波力が減少すること、及び Pitch の固有周期が長周期化しているためと思われる。

定格時、カットアウト時、暴風時それぞれの時の応答変位の有義値、有義周期の実験結果及び解析結果は表-5～表-10に示してある。波浪応答倍率の結果から予測されるとおり、Surge に関しては単純円筒型と二段円筒型の間に大きな差異はないが、Heave、Pitch に関してはかなり応答低減していることが分かる。ただし、定格時における Heave 応答



は、二段円筒型の方が大きくなっているが、これは短周期側では二段円筒型の方が大きな波浪応答倍率となっている影響と考えられる。

図-10～図-12 にカットアウト時の二段円筒型模型浮体の不規則波に対する動揺の時刻歴波形の一例を示す。Surge, Pitch 応答においては、Surge の固有周期(=16.8s)に一致する長周期動揺が顕著に現れていることが分かる。実験では、水槽端部からの長周期波の反射の影響もあり、一方向波を仮定する式(8)を入射波とするシミュレーションでは長周期動揺を完全に再現するのは難しい点もあると考えられるが、基本的な応答性状は、今回のシミュレーションでよく再現できていることが分かる。

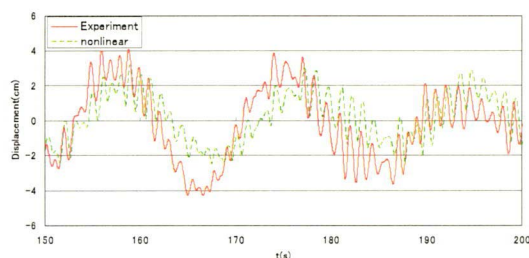


図-10 二段円筒型模型浮体のSurge動揺時刻歴

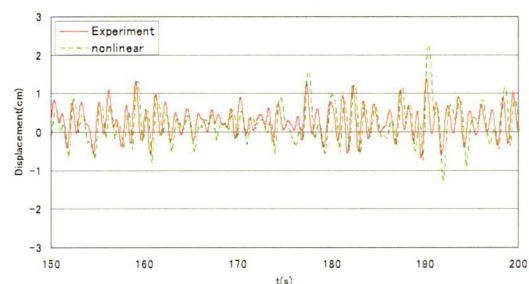


図-11 二段円筒型模型浮体のHeave動揺時刻歴

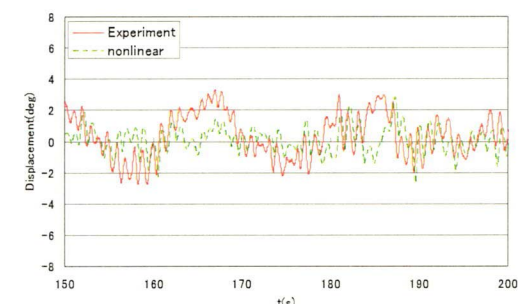


図-12 二段円筒型模型浮体のPitch動揺時刻歴

## 5. まとめ

(1) 波浪動揺実験によって、単純円筒型模型浮体の2つのモデルの規則波に対する波浪応答倍率は、波高 3.0cm, 6.0cm で Surge, Pitch で概ね 1.2 以下であり、良好な動揺特性が確認できた。しかし、Heave の波浪応答倍率は固有周期 1.6s 付近で波高 3.0cm で最大 3.0, 波高 6.0cm で最大 2.0 程であり、鉛直動揺特性に課題があることが分かった。

(2) 単純円筒型模型浮体の2つのモデルに対する不規則波実験結果より、Pitch の波浪動揺低減の観点から見れば、係留は重心よりも上部に取り付ける方が有利であることがわかった。

(3) Heave 共振を回避する二段円筒型浮体は、洋上風力発電用の基盤浮体としては、単純円筒型浮体よりも良好な性能を有することが、不規則波に対する実験結果からも確認された。

(4) モリソン式を用いた浮体動揺解析プログラムによる解析値は、規則波に対する実験値を良好に再現できた。不規則波に対する実験値に対しても、長周期動揺を含めておおむね再現できているが、係留索に生ずる減衰力の評価や、Heave 方向の抗力係数の設定法について今後、検討を加える必要がある。

## 参考文献

- 1) 助川博之, 石原孟, 山口敦, 福本幸成, 土谷学: 浮体式洋上風力発電に関する研究(その1)洋上風況観測と洋上風力賦存量の評価, 第28回風力エネルギー利用シンポジウム, 2006.
- 2) 石原孟, ファバンフック, 助川博之, 嶋田健司, 大山巧, 宮川昌宏: 浮体式洋上風力発電に関する研究(その2)軽量セミサブ型浮体の開発, 第28回風力エネルギー利用シンポジウム, 2006.
- 3) 福本幸成, 森屋陽一, 土谷京助, 原基久, 鈴木英之: 浮体式洋上風力発電に関する研究(その3)鉄筋コンクリート製二段円筒型浮体の開発, 第28回風力エネルギー利用シンポジウム, 2006.
- 4) 北村文俊, 國分健太郎, 大川豊, 矢後清和: 相模湾沖の風の性質と洋上に適した風車特性の検討, 第28回風力エネルギー利用シンポジウム, 2006.
- 5) 矢後清和, 大川豊, 宮島省吾, 中條俊樹, 石井健一, 高野宰: 浮体式風力発電の実現可能性に関する総合的評価, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 1009-1014, 2007.
- 6) 大川豊, 宮島省吾, 鈴木英之, 関田欣治, 日根野元裕: 浮体式洋上風力発電による輸送用代替燃料創出に資する研究, 2003.
- 7) 森屋陽一, 安野浩一朗, 原基久, 福本幸成, 鈴木英之, 藤田圭吾: 洋上風力発電のためのRC製二段円筒型浮体の動揺特性, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 985-990, 2007.
- 8) Clauss, G., Lehmann, E., Ostergaard, C.: Offshore Structures Volume 1, Springer-Verlag, 1991.
- 9) 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.