

不規則波中動揺実験による洋上風力発電用バージ型浮体の安定性および安全性の検証

Stability and Safety Verification of Barge-type Floating Structure for Offshore Wind Turbine by a Motion Experiment in Irregular Waves



田村大樹	Hiroki Tamura	①
新里英幸	Hideyuki Niizato	②
大窪慈生	Shigeki Ohkubo	③
三谷俊輔	Shunsuke Mitani	④

あらまし

Hitachi Zosen造船は、2014年からNEDO次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（バージ型）に取り組んでいる。その一環として、バージ型浮体の安定性と安全性を確認するために、縮尺1/50の浮体模型を用いて水槽実験を実施した。水槽実験において、実海域における50年確率波を想定した入射波条件下で浮体の安定性を検証した。また、係留索のうち1本の破断時や浮体内の区画への浸水時などの条件を設定して浮体の安全性を検証した。

実験の結果、全ての条件において、越波は発生したが浮体模型は転覆しなかった。このことから、本実験条件下においては、バージ型浮体の安定性と安全性が確認できたと考える。

Abstract

Hitachi Zosen Corporation has been working on a demonstration project of next-generation floating offshore wind turbine (barge-type) by NEDO since 2014. As part of the project, a water tank experiment was performed using a 1/50 scale model in order to confirm stability and safety of the floating structure. In the water tank experiment, stability of the floating structure was verified under the incident wave condition assuming a 50-year stochastic wave in the actual sea area. Moreover, safety of the floating structure under conditions such as when one mooring line broke, and when one floating compartment was flooded was verified.

As a result of the experiment, it was confirmed that deck wetness occurred, however the floating structure model did not capsize under any experimental conditions. Therefore, stability and safety of the barge-type floating structure under these experimental conditions are also indicated.

1. 緒言

四方を海に囲まれている日本では、洋上風力発電がエネルギー源として大きく期待されている。洋上風力発電は風車の支持構造の違いにより、浮体式と着床式に大別される。一般的に浮体式洋上風力発電の場合、50 m以深の海域が適地であり、そのエネルギーポテンシャルは着床式の適地である50 m以浅の海域の約4倍である。

したがって、浮体式洋上風力発電の普及がエネルギー源確保のために重要である。

当社は2014年から国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務として、次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究（バージ型）に取り組んでいる。本実証研究は、丸紅株式会社、株式会社グローバル、エコ・パワー株式会社、国立大学法人東京大学、九電みらいエナジー株式会社と共同で実施しており、当社は浮体の開発、設計・製作、現地施工および観測データ解析を担当している。実証機は北九州市沖約15 kmの海域に設置され、2019年5月から実証運転が行われている。実証機の設置に先立ち、当社は平面水槽を利用して2期に分けて水槽実験を実施した。

① 技術研究所 ものづくり基盤研究センター

② 技術研究所 ものづくり基盤研究センター 博士(工学)、技術士(船舶・海洋部門)

③ 社会インフラ事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部 博士(工学)

④ 社会インフラ事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部

第1期水槽実験では当社が独自で開発した浮体の構造に着目し、**図1**に示すムーンプールやスカート性能評価を行った¹⁾。ムーンプールとは浮体中央に設けられた中空部であり、スカートは浮体底面に設けられた板状の構造物である。また、浮体はバジ型の特徴である喫水が小さいことから、浅海域でも設置可能である。

第2期水槽実験においても第1期と同様に、ムーンプールおよびスカートを有する浮体模型を用いた。実験の目的は、実海域にて50年間で発生すると想定される最も厳しい環境条件に対する浮体の安全性の検証である。本論では、第2期水槽実験により得られた結果およびそれに対する考察について報告する。

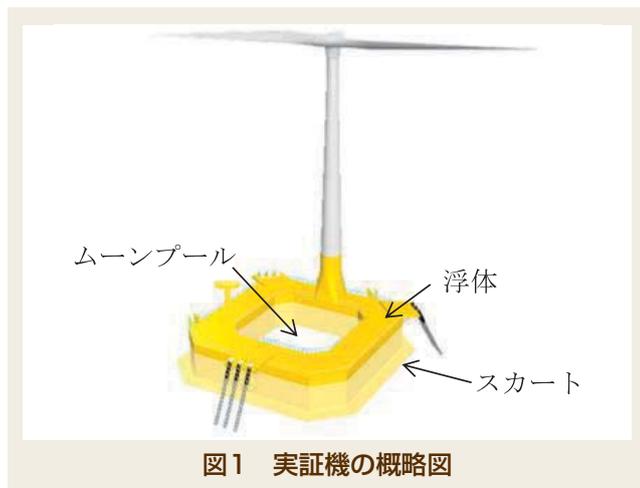


図1 実証機の概略図

2. 実験方法

2.1 使用水槽 実験に用いた平面水槽の諸元は以下のとおりである。

- 寸法：長さ60 m、幅25 m、水深3.2 m
- 造波装置：80分割式、1.8 kW×80機のACサーボモータで駆動
- 生成波：規則波0.3~4.0sec、最大波高0.4 m、一方向不規則波、多方向不規則波

2.2 主要目

2.2.1 座標系 供試模型の概略図を**図2**に示す。浮体上面にタワーを搭載している方向を船尾側、その反対方向を船首側と定義する。座標系は浮体上面の船尾側端部の中央を原点OとするO-xyz座標系を用いる。座標軸の方向は、船首方向をx軸の正、鉛直上方向をz軸の正とする右手系とする。

供試模型の6自由度運動の定義を以下で説明する。まず変位運動に関して、x軸、y軸、z軸方向の運動はそれぞれSurge、Sway、Heaveである。変位運動の正の方向はそれぞれ+x、+y、+z方向とする。次に、x軸、y軸、z軸回りの回転運動はそれぞれRoll、Pitch、Yawである。回転運動の正の方向はそれぞれの座標軸に対して右ねじの法則に従うものとする。

また、波向き θ は船尾側から船首側に向かう波（追波）を0 degとし、反時計回りを正とする。

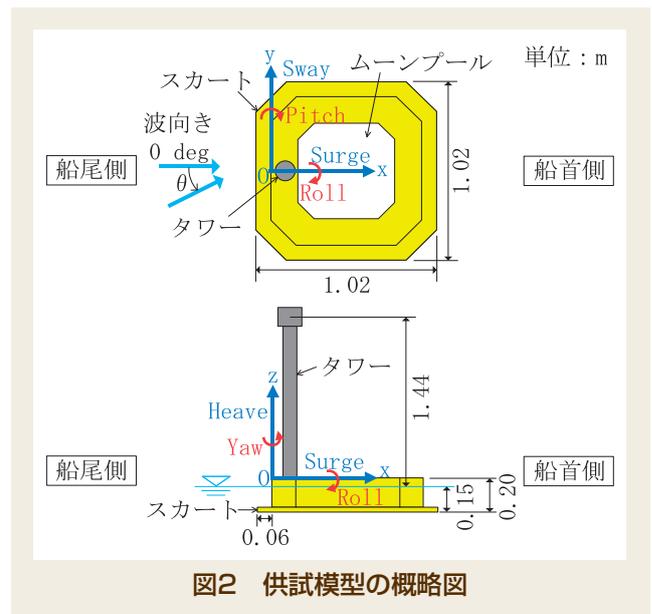


図2 供試模型の概略図

2.2.2 浮体の主要目 実験では縮尺1/50の供試模型を使用した。供試模型の写真を**図3**に示す。浮体模型上面にタワー模型を設置した。

本来、実証機のタワーやその上端のRNA (Rotor Nacelle Assembly: ハブ、ブレード、ナセルの総称) に風荷重が作用するが、実験では風荷重発生装置を用いて一定荷重として与える。よって、風車模型としては、RNAに相当する質量を錘として模擬し、タワー模型上端に載せた。

浮体の主要目を**表1**に示す。重心高さKGは浮体底面の中心点K (Keel) から重心Gまでの距離を表し、メタセンター高さGMは重心Gからメタセンター M (Metacenter) までの距離である。ここで、メタセンターとは浮体が傾くときの回転中心である。また、x、y、z軸周りの環動半径をそれぞれKxx、Kyy、Kzzとし、**表1**にその値を示す。

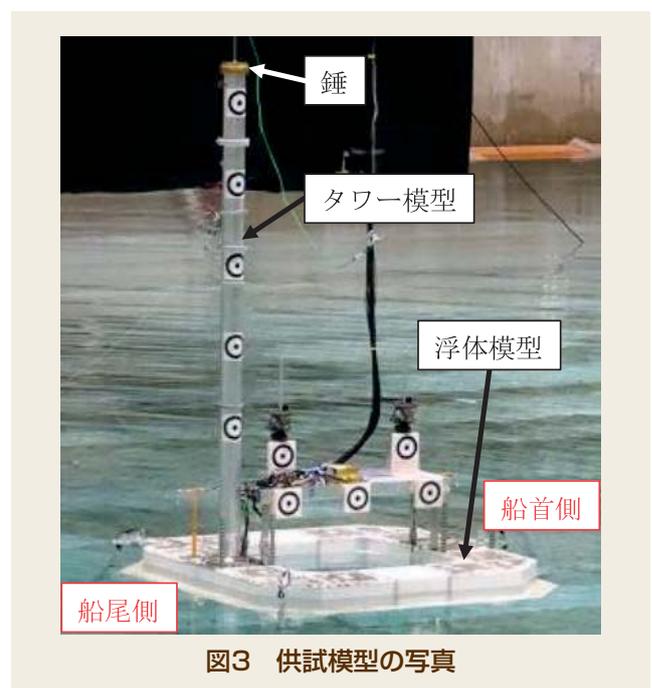


図3 供試模型の写真

表1 浮体の主要目

項目	実証機	模型 (1/50)
浮体重量 (タワー、RNA、バラスト含む)	9760.0 tf	78.08 kgf
長さ (スカート含む)	51.0 m	1.02 m
幅 (スカート含む)	51.0 m	1.02 m
高さ	10.0 m	0.20 m
喫水 (係留索設置後)	7.5 m	0.15 m
重心高さ KG	7.5 m	0.15 m
メタセンター高さ GM	23.9 m	0.48 m
環動半径 Kxx	18.7 m	0.37 m
環動半径 Kyy	20.3 m	0.41 m
環動半径 Kzz	21.1 m	0.42 m

2.2.3 係留系の主要目 係留系の主要目を表2に示す。係留系は浮体側係留点3か所、各係留点における係留索数を3本とした。それぞれの係留索は図4に示すように、船首側をML1~3として反時計回りに順にML1~9と呼ぶ。

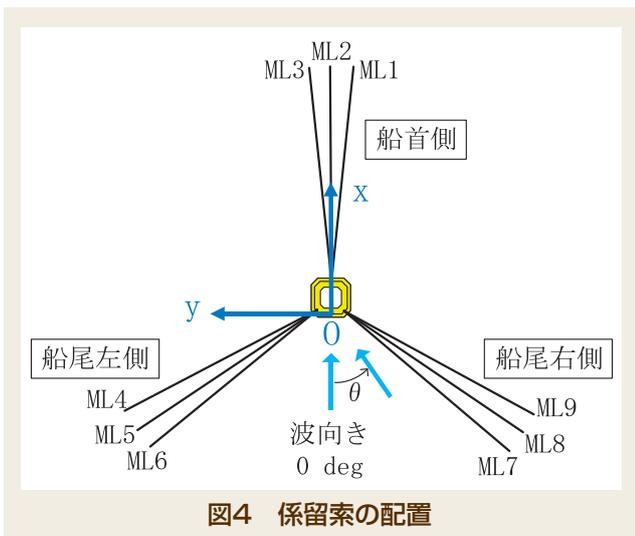


図4 係留索の配置

表2 係留系の主要目

項目	実証機	模型 (1/50)
係留索本数	3本×3か所	3本×3か所
チェーン長さ	526 m	10.52 m
チェーンリンク径	132 mm	3.00 mm
単位質量	349 kg/m	0.15 kg/m

2.3 計測方法

2.3.1 外力の負荷方法

実験では浮体が受ける荷重が最大となるように、波と同一の方向から風、潮流に相当する荷重を与えた。潮流荷重は図5に示すように、相当する重量を有する錘を吊り下げ、浮体を船尾方向に水平に引っ張って与えた。潮流は浮心に対して作用するため、浮心と同じ高さの点を荷重の作用点とすることが望ましいが、浮心は水中であるため、荷重の作用点を浮心高さとするワイヤーが水中に没することとなり、波の影響により荷重が変動する恐れがある。そのため、実験では潮流荷重の作用点を浮体上端とした。作用点の違いによって発生するモーメントをデータ処理により補正した。また、風荷重は同等の力でタワー模型を船尾方向に引っ張ることで与えた。

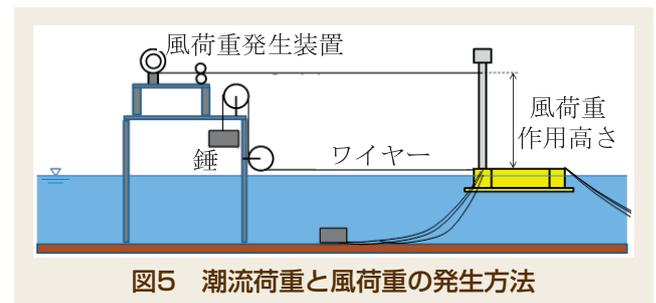


図5 潮流荷重と風荷重の発生方法

2.3.2 使用機器

計測項目および使用機器を表3に、各機器の取り付け位置を図6に示す。波高および波周期は、浮体の船首側と横側近傍に設置した波高計により計測した。また、浮体の6自由度運動は6軸慣性ジャイロセンサーおよびビデオカメラを用いた動画解析により計測した。動画解析用ターゲットは図6(b)に示すように配置した。

表3 計測項目および使用機器リスト

計測項目	計測場所	CH数	使用機器
波高	浮体近傍 (船首側) 1点	2	容量式波高計
波周期	浮体近傍 (横側) 1点		
加速度 (Surge, Sway, Heave) 角度 (Roll, Pitch, Yaw)	浮体中央部	6	6軸慣性ジャイロセンサー
6自由度運動 (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw)	浮体横側の岸	—	ビデオカメラ 3次元運動解析装置
係留索張力	浮体側係留点	3	防滴型リングゲージ式ロードセル
タワー下部のひずみ	タワー下部船首側と右側	2	ひずみゲージ
越波量	浮体の船首側 1点 ムーンプール船首側 1点 ムーンプール船尾側 1点	3	容量式波高計
スカートに作用する圧力	船首側スカートの上下	2	圧力計

係留索張力は、船首側、船尾左側および船尾右側の浮体側係留点付近にそれぞれ1つずつ設置したロードセルにより計測した。1か所につき3本ある係留索を1つのロードセルに接続したため、計測される張力は係留索3本の合計値である。

タワーの下部に作用する曲げモーメントは、タワー下部の船首側および右側面に貼り付けたひずみゲージから得られるひずみ値から換算した。左右方向および前後方向の曲げモーメントの正方向を図7に示す。

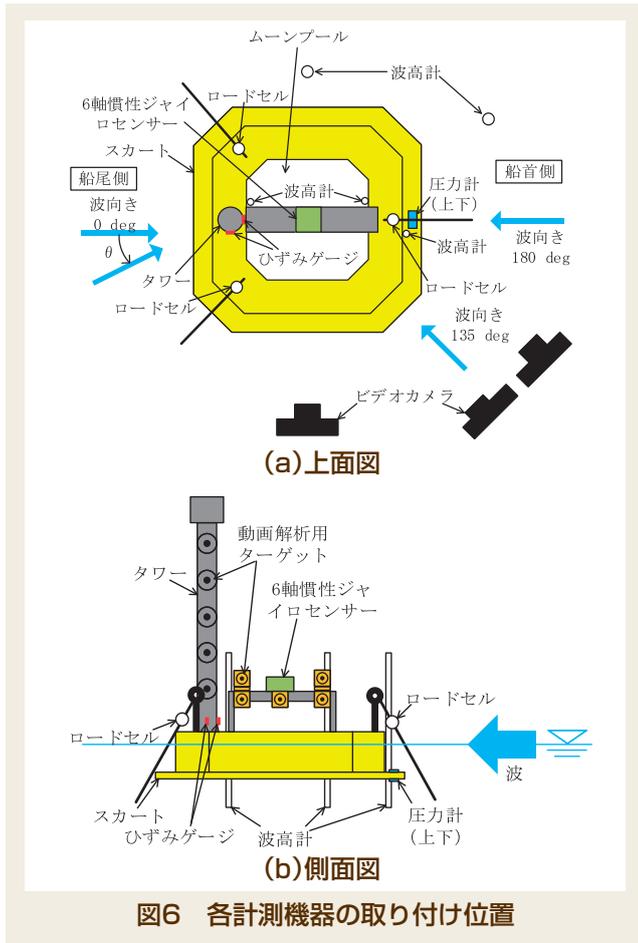


図6 各計測機器の取り付け位置

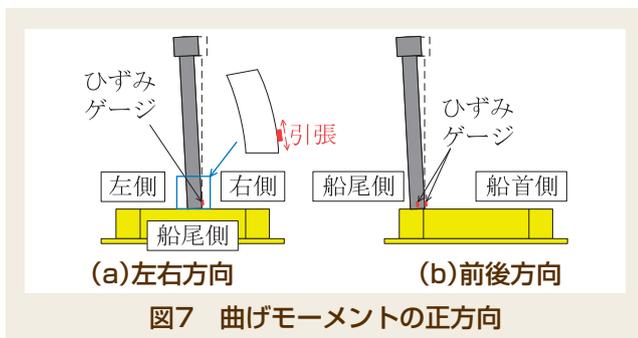


図7 曲げモーメントの正方向

2.3.3 越波の計測 浮体において、図8 (b) に示すように波が浮体上面を越える越波が発生することがある。実験では越波の発生について調べるために、浮体の船首側と船尾側に合計3本の波高計を取り付けた。この波高計は浮体に連動するため、浮体の運動に対する相対水位が計測される。これらの波高計により計測される相対水位から、船首側および船尾側の越波の発生を評価した。

浮体上面を相対水位0 cmとし、浮体上面より上側を相対水位の正とすると、図8 (b) のように相対水位が正となる場合に越波が発生していると判定することができる。

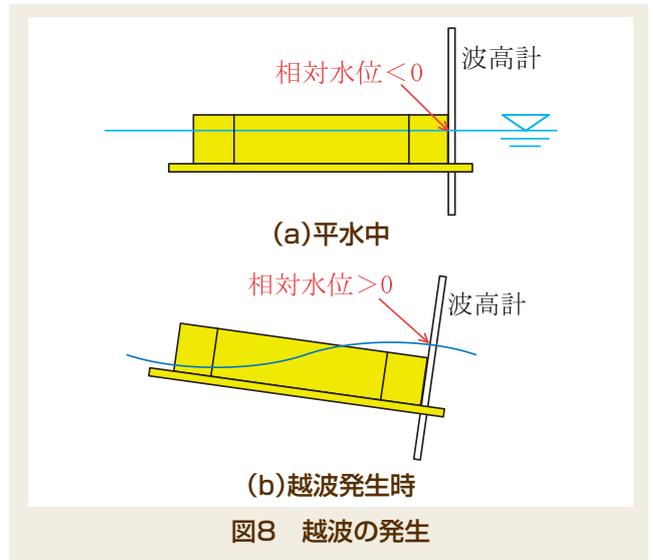


図8 越波の発生

2.3.4 スラミングの計測 浮体の運動が激しいとき、図9 (b) のように浮体底面が大気中に露出することが想定される。このとき、露出した底面が再び水面に接触する際に大きな衝撃力を受ける。この現象は一般的にスラミングと呼ばれる。浮体に取り付けた上記の波高計により、スラミングの発生も評価した。

図9 (a) に示す波高計から得られる水位をH1~ H3とし、平水中の状態ではH1=H2=H3=0と定義した。またスカート下面に圧力計を取り付け、衝撃力発生の有無を確認した。圧力計も波高計と同様に、平水中の状態ではP1=0とした。以上より、スラミング発生の有無、すなわち浮体底面が波面よりも上方に位置しているかの判定条件は表4に示すとおりである。ここで、喫水dは15 cmであり、静水圧P0は以下の式 (1) で表される。

$$P_0 = \rho g d (= 1.47 \text{ kPa}) \quad (1)$$

ρ は水の密度、 g は重力加速度である。

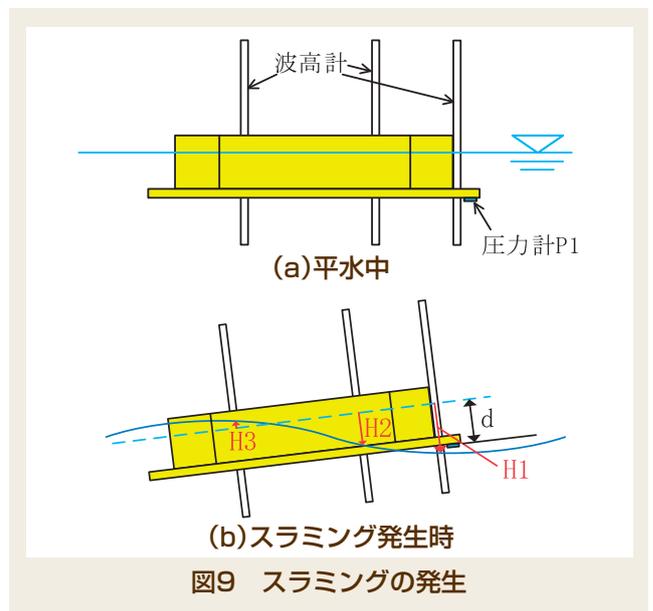


図9 スラミングの発生

表4 スラミングの判定条件

スラミング発生の判定条件	予測現象
圧力 P1+静水圧 P0<0	船首側スラミング
波高 H1+喫水 d<0	
波高 H2+喫水 d<0	
波高 H3+喫水 d<0	船尾側スラミング

2.4 実験ケース 実験ケースを表5に示す。風車に作用させる設計荷重ケース (DLC) はIEC (国際電気標準会議) により設定されている。実験ではこれに応じた条件で計測した。表中のDLC6.1は、風車の回転静止あるいは遊転により発電が停止している状態に、50年間で予測される最大風速48.5 m/sが作用する条件である。また、DLC1.6およびDLC1.1は発電時の条件である。

外力条件のうち、波については不規則波を与える。不規則波の各周波数成分はランダムな位相を有し、その位相差を一様乱数により決定する。すなわち、乱数パターンにより発生する不規則波が異なる。Case No.1~3では、その乱数パターンのみを変化させた。

Case No.6はDLC6.1の条件下で浮体船首側の係留索 (ML1) が破断した場合を想定したケースである。係留索は浮体係留点1か所につき3本であるため、ML1が破断した場合、浮体船首側の係留索は2本 (ML2、ML3) となる。また、Case No.8は浮体内の区画への浸水を想定したケースである。浸水箇所は図10に示すように浮体の船尾左側とした。入射波は浸水箇所と反対方向である135 degの方向から与えた。

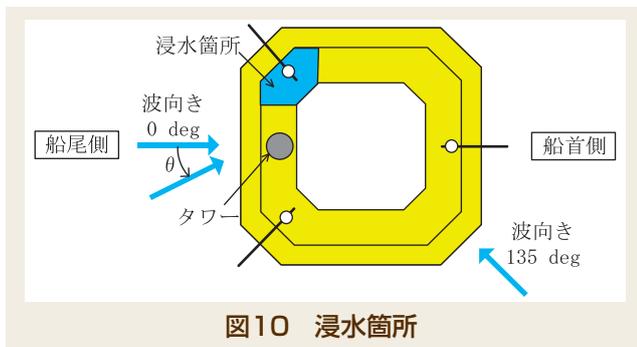


図10 浸水箇所

表5 実験ケース(模型ベース表示)

Case No.	環境条件	有義波高	有義波周期	潮流荷重	風荷重作用高さ	波向き θ	乱数パターン
		[m]	[sec]				
1	DLC6.1	0.196	1.50	460	100	180	1
2	DLC6.1	0.196	1.50	460	100	180	2
3	DLC6.1	0.196	1.50	460	100	180	3
4	DLC1.6	0.196	1.50	0	136	180	1
5	DLC1.1	0.040	0.89	0	136	180	1
6	ML1 破断/DLC6.1	0.196	1.50	460	100	180	1
7	DLC6.1	0.196	1.50	460	100	135	1
8	区画浸水	0.135	1.34	300	100	135	1

3. 実験結果および考察

3.1 浮体運動 浮体の最大傾斜角度および最大変位量を表6および図11に示す。表中の数値は模型における計測結果である。したがって、変位については、実証機のスケールに換算するために1:50の力学的相似則により補正する必要がある。

まず、Case No.1~6において、図11 (a) からRoll角度と比較してPitch角度の方が大きいことが分かる。これは、入射波が $\theta=180$ degの一方向平面波であることにより、浮体から見て入射波は左右対称でありRoll運動がほとんど発生しないためであると考えられる。一方で、浮体の船首側と船尾側には波の位相差が生じるため、Pitch角度は大きくなる。Pitch角度は最大で13.3 degであった。

次に、Case No.7、8において、Case No.1~6と比較してYaw角度が大きい。これは、 $\theta=135$ degであり浮体に対して斜め方向から入射波が作用したためであると推測される。

最後に、Case No.1~8において、浮体が転覆しない結果を得た。つまり、この浮体は厳しい環境条件下でも安定性が高いと言える。

表6 浮体の最大傾斜角度および最大変位量

Case No.	Roll 角度	Pitch 角度	Yaw 角度	Surge 変位	Heave 変位
	[deg]	[deg]	[deg]	[m]	[m]
1	1.8	11.7	5.7	0.46	0.17
2	1.9	10.8	5.2	0.39	0.17
3	2.0	10.7	9.0	0.37	0.16
4	2.1	10.5	6.9	0.71	0.17
5	0.2	1.6	1.7	0.39	0.02
6	2.3	13.3	5.0	0.38	0.16
7	8.9	7.6	14.3	0.69	0.14
8	7.6	7.6	9.3	0.63	0.11

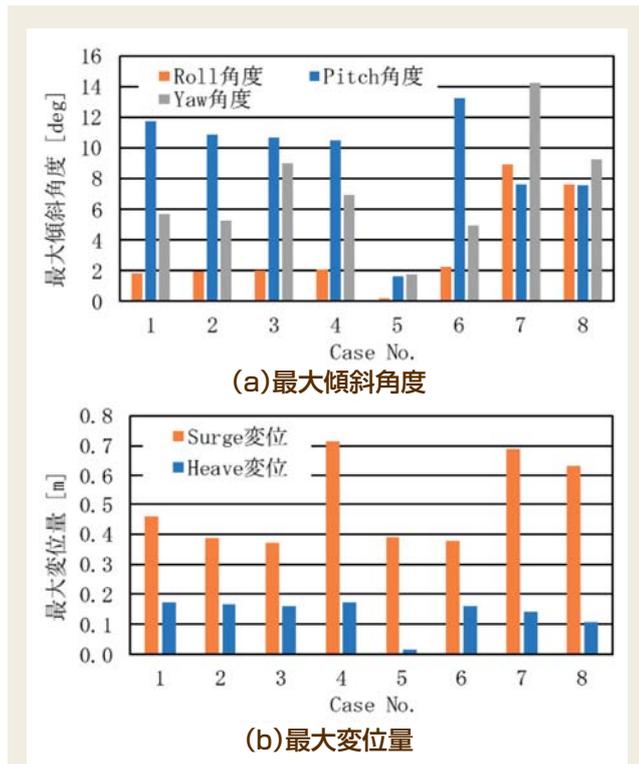


図11 浮体の最大傾斜角度および最大変位量

合は、浮体が船首側から外力を受けて船尾側の方向に変位した。したがって、船首側係留索が引っ張られるために、船首側係留索の張力が增大したと考えられる。また、 $\theta=135$ degの場合も同様に、船尾左側に浮体の変位したため船首側と船尾右側の係留索が引っ張られて張力が增大したと推測される。

係留索張力の平均値を図13に示す。船首側係留索の張力の平均値が最大のケースはCase No.2であった。Case No.2は $\theta=180$ degで船首側係留索に最も張力が作用するケースであり、かつ波高が実験ケースの中で最大であったため、船首側係留索に大きな張力が作用したと考えられる。

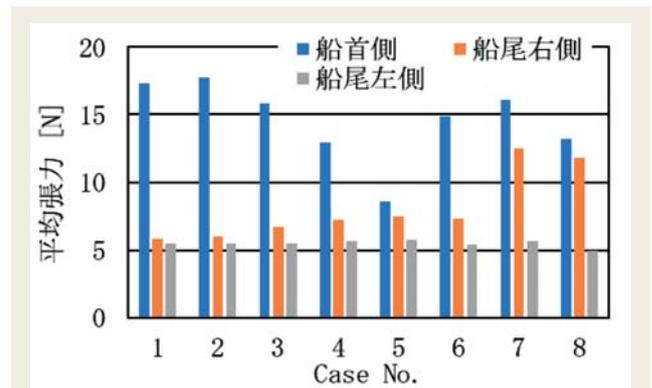


図13 係留索張力の平均値

3.2 係留索張力 係留索張力の時系列データを図12に示す。ここでは波向き θ に着目し、 $\theta=180$ degであるCase No.1の結果を図12(a)に、 $\theta=135$ degであるCase No.7の結果を図12(b)に示す。図に示すように、 $\theta=180$ degの場合は船首側のみ、 $\theta=135$ degの場合は船首側と船尾右側の張力が增大した。 $\theta=180$ degの場

3.3 タワー下部の曲げモーメント 曲げモーメントMは、断面係数Z、ヤング率E、ひずみ値 ε を用いて、 $M=ZE\varepsilon$ で表される。ひずみ値 ε は実験で計測したデータを用いて算出した。タワー模型はアルミ製の円筒である。計算に用いた各パラメータの値は以下のとおりである。

- アルミのヤング率E : 70600 [N/mm²]
- タワー模型の断面係数Z : 2689 [mm³]

左右方向および前後方向のタワーの曲げモーメントの最大値を図14に示す。図中には正と負の曲げモーメントの最大値を絶対値で示している。図から、Case No.1~6については前後方向の曲げモーメントが左右方向に比べて大きいことが分かる。これは、Case No.1~6においてPitch角度がRoll角度よりも大きいからであると推測される。これを確認するため、Pitch角度と前後方向曲げモーメントの相関を調べた。その結果を図15に示す。赤色の線は1次の近似曲線を表す。本図でも明らかなように、Pitch角度と前後方向曲げモーメントには強い相関がある。したがって、Case No.1~6ではPitch角度の増大に伴い前後方向の曲げモーメントが大きくなったと推測される。Case No.7, 8においても同様の理由により、Roll角度とPitch角度が同程度であるため、左右方向と前後方向に顕著な差が表れていないと考えられる。

また、前後方向の曲げモーメントは全てのケースにおいて正方向の方が負方向よりも大きい結果であった。これは風荷重発生装置によりタワー上部を船尾方向に引っ張ることで船尾方向に傾きやすくなったためであると考えられる。

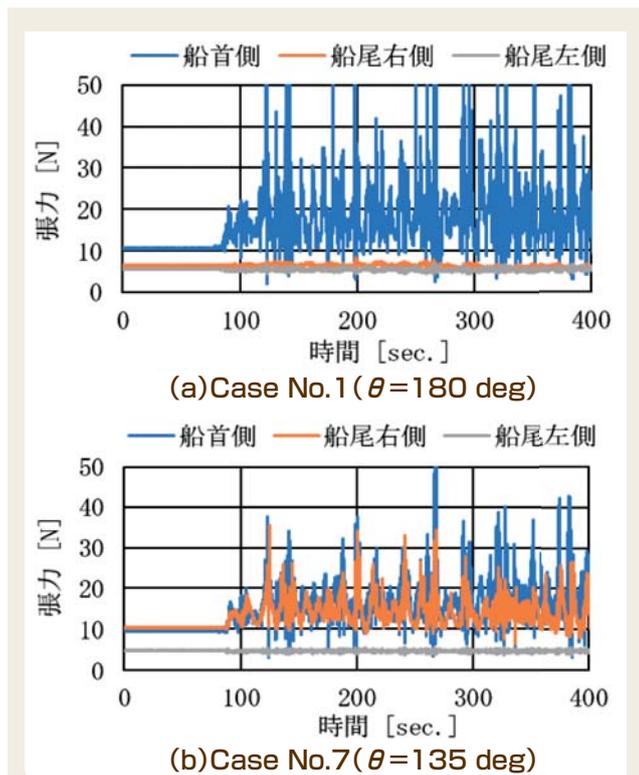
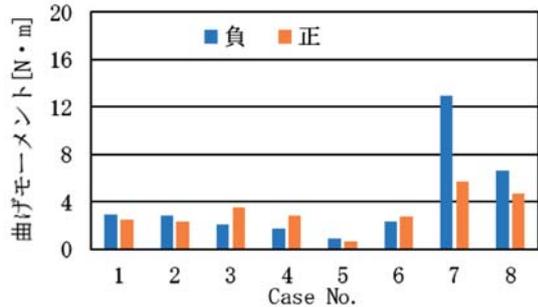
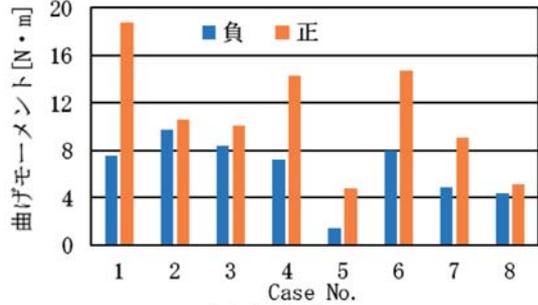


図12 係留索張力の時系列データ



(a)左右方向



(b)前後方向

図14 曲げモーメントの最大値(絶対値)

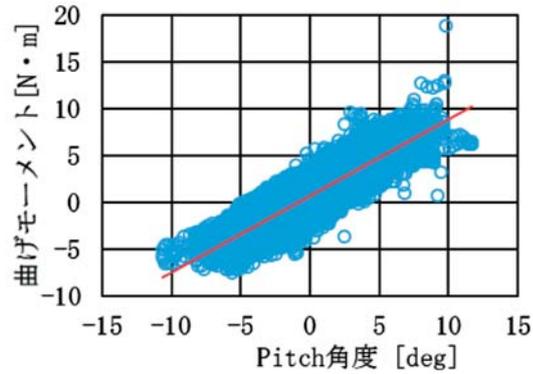
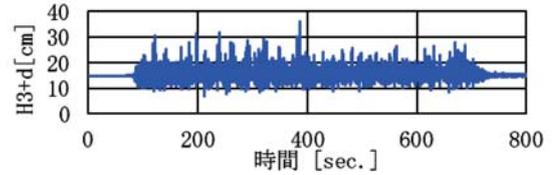
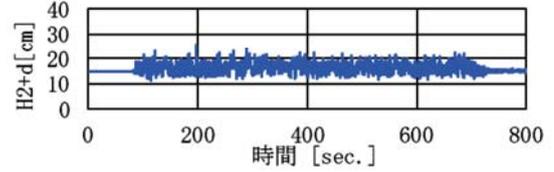
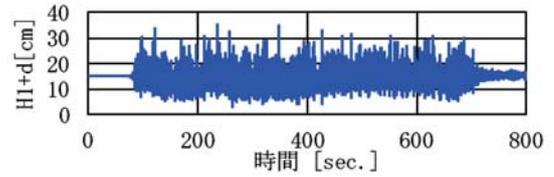
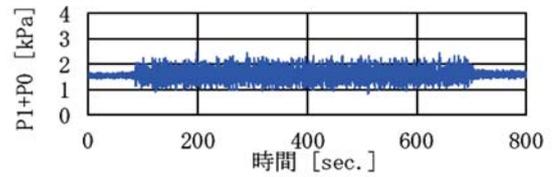


図15 曲げモーメントと傾斜角度の相関(Case No.1)

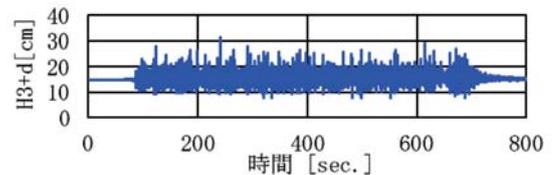
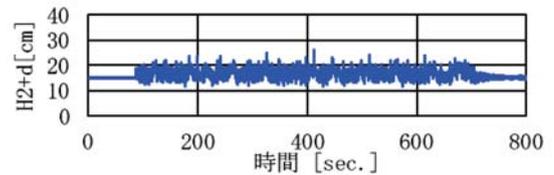
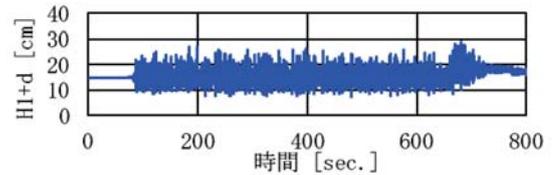
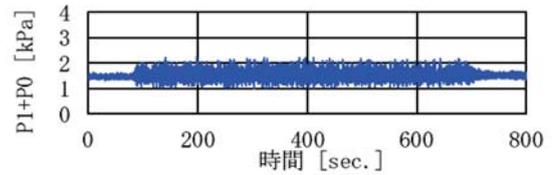
表7 越波する割合

Case No.	計測時間に対して越波している時間の割合[%]	
	船首側	船尾側
1	17.0	7.2
2	12.4	17.3
3	10.9	5.4
4	35.6	7.3
5	0.6	0.02
6	26.4	20.4
7	8.1	9.0
8	43.9	7.0

3.4 越波の発生 計測時間中の越波が発生している時間の割合を表7に示す。発生頻度は異なるが、全ケースにおいて船首側、船尾側それぞれで越波を確認した。最も頻繁に越波が発生したケースはCase No.8であることがわかる。Case No.8は浮体内の区画への浸水を想定したケースであり、浸水による浮体の傾斜や乾舷



(a)Case No.1



(b)Case No.7

図16 スカート下面の圧力と相対水位の時系列データ

高さの低下が影響して越波の発生頻度が高くなったと推測される。ここで、乾舷高さは水面から浮体上面までの距離である。

3.5 スラミングの発生 表4に示す判定条件の式を用いて算出した時系列データのうち、Case No.1を図16 (a)、Case No.7を図16 (b) に示す。図から明らかなように、全ての時刻において各グラフで正の値を示した。したがって、スラミングが発生しなかったと言える。また、他の全てのケースにおいても同様に判定条件を満たすことはなく、実験のケースではスラミングが発生しない結果を得た。ただし、実験のケースは限られていること、十分な安全性の確保が必要であることから、設計ではスラミング荷重に対する強度検討も実施し、構造設計に反映している。

4. 結 言

当社が独自開発した浮体の安全性を検証するため、縮尺1/50の供試模型を用いて水槽実験を実施した。実験では、実海域において50年間で発生すると想定される最も厳しい環境条件を浮体に対して与えた。

実験の結果、全ての実験条件において越波は発生したが、浮体は転覆しないことが明らかになった。また、スラミングは全ての実験条件で発生しなかった。以上より、50年間で発生すると想定される最も厳しい環境条件に対する浮体の安全性が証明された。

【謝辞】

本研究開発は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務として実施された。関係者の皆様方に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Kosasih, K-M-A, Niizato, H., Okubo, S., Mitani, S. and Suzuki, H. : Wave Tank Experiment and Coupled Simulation Analysis of Barge-type Offshore Wind Turbine, ISOPE, 2019, 390-397.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業企画・技術開発本部
技術研究所 ものづくり基盤研究センター
田村大樹
Tel : 080-6199-9729 Fax : 06-6551-9086
e-mail : h_tamura@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Business Planning & Technology Development
Headquarters
Technical Research Institute
Innovative Manufacturing & Technology
Research Center
Hiroki Tamura
Tel : +81-80-6199-9729 Fax : +81-6-6551-9086
e-mail : h_tamura@hitachizosen.co.jp



田村大樹



新里英幸



大窪慈生



三谷俊輔