

# 水理模型実験を用いた 気中および没水吊荷の動揺特性

小林 拓磨<sup>1</sup>・高橋 研也<sup>2</sup>・西畑 剛<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: takuma.kobayashi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup> 正会員 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: kenya.takahashi@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup> 正会員 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

気中もしくは没水状態の矩形ケーソンおよび円柱スパー型洋上風車を起重機船で揚重施工する際、波浪によって生じる船および吊荷の動揺特性を把握するための水理模型実験を実施した。吊荷気中時では、特定の波周期に対して吊荷の並進運動が大きくなる共振が見られ、施工が危険となる波浪条件を確認できた。異なる2つの波向に対する動揺量の比較からは、斜め方向の入射波によって横方向の動揺量が誘起される現象を確認し、施工中の波向急変に伴う動揺特性の変化を評価した。円柱吊荷没水時においては、吊荷のYawが卓越するなど激しい動揺が観測され、洋上風車本体とスパー型浮体の連結施工時、急激な動揺量増大リスクのあることが示唆された。また、多方向不規則波実験では単一方向不規則波よりも横方向の動揺量が大きくなることが確認された。

**Key Words :** floating crane vessel, caisson, offshore wind turbine, lifting operation, coupled motion

## 1. はじめに

近年、起重機船によるケーソンの据付工事<sup>1)</sup>のような海上での大規模な施工に加えて、洋上風力事業などの外洋における大型工事の需要が高まっている。環境省の再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書<sup>2)</sup>によると、そのポテンシャルは約16億kWと推計されており、浮体形式の最適化の検討<sup>3)</sup>や浮体式洋上風車設置後の動揺特性についての調査<sup>4)</sup>など様々な研究が行われている。しかしその一方で、風車施工時の安定性を評価した論文は少ない。例えば、西村・宇都宮<sup>5)</sup>は、スパー型浮体式洋上風車の風車ローター取付け時における動揺抑制に関する検討を行っているが、気中の風車本体と没水したスパー型浮体の連結時に、船と長大円柱構造物からなる複数浮体連成となるため、連結の前後で異なる動揺特性を示す可能性がある(写真-1)。連結施工時のスパー上には、作業員がいる点に留意すると、動揺量の変化を注視する必要がある。また、前述の報告書<sup>2)</sup>によると、風力エネルギーの大半は水深50m以上の海域で見込まれているため、外洋での厳しい波浪条件下での吊作業時における船および吊荷の動揺特性を把握し、安全性と施工精度の観点から適切な作業中止基準を定める必要がある。

本研究では、起重機船による揚重施工を対象とした水理模型実験を行い、矩形(ケーソン)と円柱(スパー型洋上風車)の2種類の吊荷において、気中時と没水時の異なる条件下での船体ならびに吊荷の動揺量を計測した。既往の論文<sup>6),7),8)</sup>では、単一方向不規則波での実験が行われているが、比較的水深の深い海域では、多方向不規則波の性質が強くなるため、不規則波の多方向性も加味することが必要である。そこで規則波、単一方向不規則波に加えて、多方向不規則波でも実験を行った。さらに施工時に波向きが変化する事も考慮し、追い波と斜め追い波の2つの波向きを設定した。吊荷形状、波周期、波向の違いに主眼を置き、これらに対する動揺特性を把握して施工上の留意点抽出と対策を講じることを目的とした。

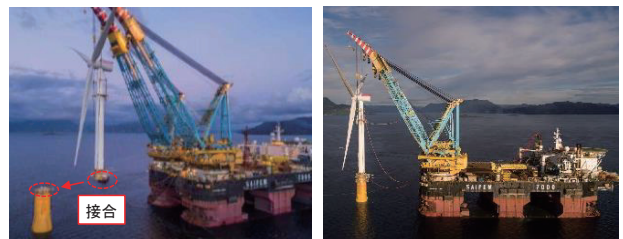


写真-1 スパー型浮体式洋上風車の施工

(<https://www.saipem.com/en/projects/hywind?referral=%2Fen%2Fprojects>)

## 2. 水理模型実験の概要

本実験では縮尺 1/100 を想定し、一様水深の平面水槽内 ( $L=20\text{ m}$ ,  $W=30\text{ m}$ ,  $H=1.5\text{ m}$ ) にクレーン船模型を4点で係留して設置した(図-1)。波浪条件などの実験の諸元を表-1に示す。吊荷懸下前の船体において、自由動揺実験を実施し、実験から得られた船の固有周期 (Roll : 12 s, Pitch : 11 s, Heave : 10 s) 付近の動揺を詳細に把握できるように波の周期を設定した。対象が深海域であるため、不規則波の周波数スペクトルは ISSC スペクトルとした。また、実海域における施工状況を再現するため、方向集中度パラメータ  $S_{max}=75$  の光易型方向関数と ISSC スペクトルを有する多方向不規則波のケースも実施した。波向は船尾方向を  $\theta=0^\circ$  と定義し、施工時における海象条件の変化も踏まえて、斜め  $45^\circ$  のケースも実施した。

続いて、船の諸元を表-2に、ケーソンを模擬した矩形

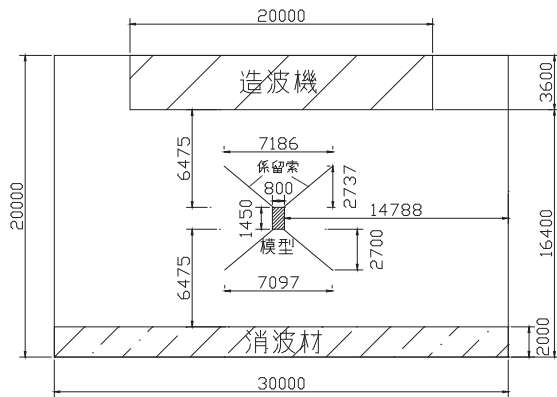


図-1 実験平面図 (単位 : mm)

表-1 実験条件 (現地スケール)

水深	90 m
波高	1.5 m
周期	規則波 : 6.0, 8.0, 10.0~12.0 (0.5 s 間隔), 14.0 s 単一方向不規則波 : 10.0 s 多方向不規則波 : 10.0 s
波向	$0^\circ$ , $45^\circ$
吊荷	ケーソン (気中, 没水) 円柱 (気中, 没水)

表-2 船体模型の諸元 (現地スケール)

船長 $L$ (m)	145
船幅 $B$ (m)	40
喫水 $d$ (m)	7.6
ジブ長さ (m)	95
ジブ角度 ( $^\circ$ )	58
$W$ (ton)	75,500

吊荷の諸元を表-3に示す。円柱吊荷については、表-4の通り、気中時と没水時のそれぞれで高さ、重量の異なる2種類の円柱模型を用いた。なお、吊荷模型の長さ  $L$  と幅  $B$  はそれぞれ船体の Surge 方向, Sway 方向と定義した。ジブと吊荷の間に吊枠を設置し、ジブと吊枠間ならびに吊枠と吊荷の間は、4点で吊り上げるようにした。円柱吊荷においては、気中時と没水時で吊荷の長さが異なるが、両条件で吊ワイヤーの長さや吊枠などの吊具は同じものを使用した。また、ジブと吊荷の間に張力計を設置し、吊ワイヤーに作用する張力を測定した。船体および吊荷の6自由度は、4台のカメラによって、船体と吊荷に4個ずつ取り付けられたマーカーを撮影し、3次元リアルタイムモーション計測システム (VENUS3D, ノビテック社製) を用いて計測を行った。なお、サンプリング周波数は、120 Hz で測定を行った。実験中における計測の様子を写真-2に示す。

表-3 ケーソン吊荷模型の諸元 (現地スケール)

長さ $L$ (m)	15.5
幅 $B$ (m)	20
高さ $H$ (m)	12.5
喫水 $d$ (m)	5.9
主巻索長さ $l_1$ (m)	56.5 (気中時) 70.9 (没水時)
補巻索長さ $l_2$ (m)	33.1 (気中時) 47.5 (没水時)
$W$ (ton)	1,817

表-4 円柱吊荷模型の諸元 (現地スケール)

直径 $D$ (m)	16.5
高さ $H$ (m)	35 (気中時) 105 (没水時)
喫水 $d$ (m)	60 (没水時)
主巻索長さ $l_1$ (m)	33.0
補巻索長さ $l_2$ (m)	9.9
$W$ (ton)	2,509 (気中時) 12,830 (没水時)

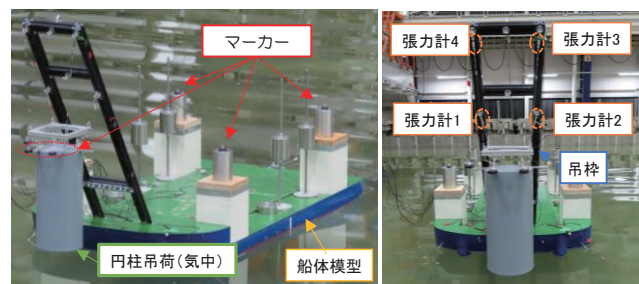


写真-2 実験状況 (円柱吊荷気中時)

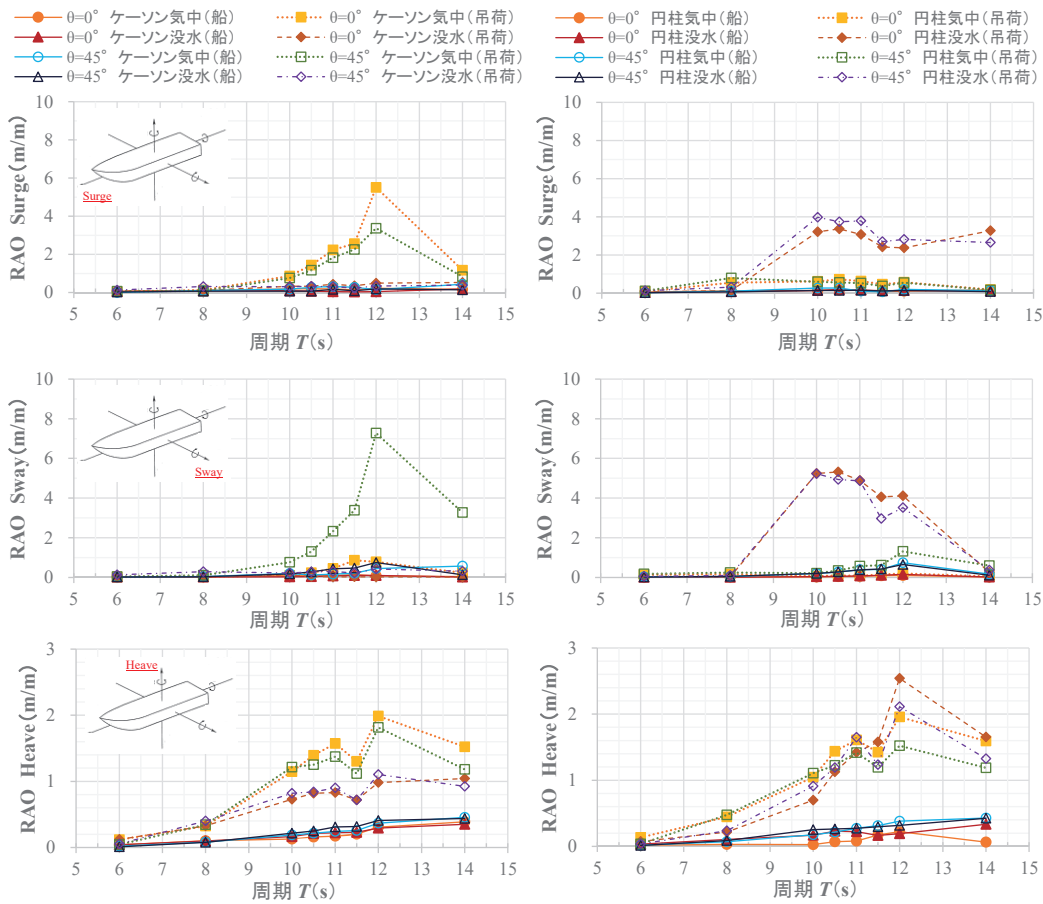


図-2 規則波における船体および吊荷の単位波高あたりの動揺量 (左: ケーンソン吊荷, 右: 円柱スパー吊荷)

### 3. 実験結果

#### (1) 実験結果の整理方法

動揺計測データには、高周波数のノイズが含まれており、吊荷の Surge と Sway には、船の係留系による長周期成分の影響が見られたため、船と吊荷の動揺特性を評価するのが難しいと判断された。そこで、計測された船および吊荷に対する 6 自由度の動揺量時系列に対しては周期 4s~25s の成分のみを抽出した。すなわち、0.04 Hz~0.25 Hz のバンドパスフィルターを通してノイズや長周期成分を取り除いた上で、実験結果を整理した。規則波は、振幅の最大値を波高  $H$  で割り、各周期における単位波高あたりの動揺量として整理した。不規則波実験に対しては、FFT を用いて動揺量のパワースペクトル密度を算出し、周波数応答特性を確認した。

#### (2) 規則波および単一方向不規則波の実験結果

規則波中の船体および吊荷における、単位波高あたりの並進運動量 (Surge, Sway, Heave) を図-2 に示す。ケーンソン気中時における吊荷の Surge は、 $T=12$  s で動揺量が著しく増加した。ここで、図-3 の単一方向不規則波中における Surge スペクトルに着目すると、有義波周期  $T_{1/3}=10$

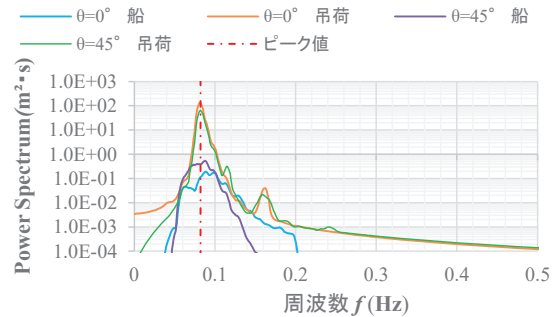


図-3 ケーンソン吊荷における単一方向不規則波中の Surge スペクトル密度

s よりも長周期側 ( $T=12$  s 程度, 周波数  $f=0.82$  Hz) にピーク値が見られた。このことから、周期 12 s の波成分に対し吊荷が共振したといえる。このように吊作業時には、波の周期との共振に注意する必要がある。規則波における Roll, Pitch, Yaw の動揺量を図-4 に示す。波向の違いに着目すると、船の Roll 固有周期である  $T=12$  s の時に船の Roll が顕著に増加していることがわかる。特に、ケーンソン気中時においては、船の Roll の固有周期に併せて、吊荷の Yaw と Sway の横運動が増大しているため、斜め方向の入射波によって横方向の動揺が励起されることがわかる。以上のことから、施工時において斜め後ろから波を受けた場合、動揺量が大きくなる傾向にあ

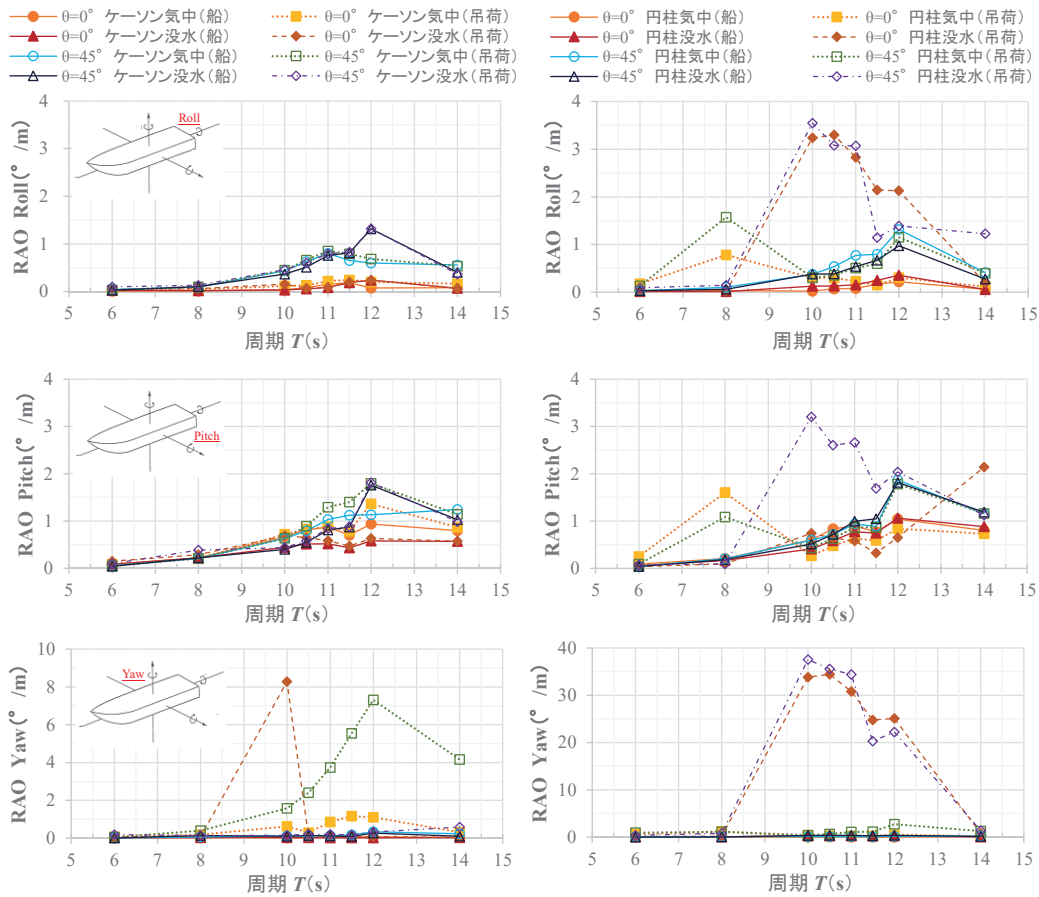


図4 規則波における船体および吊荷の単位波高あたりの回転量 (左: ケーン吊荷, 右: 円柱スパー吊荷)

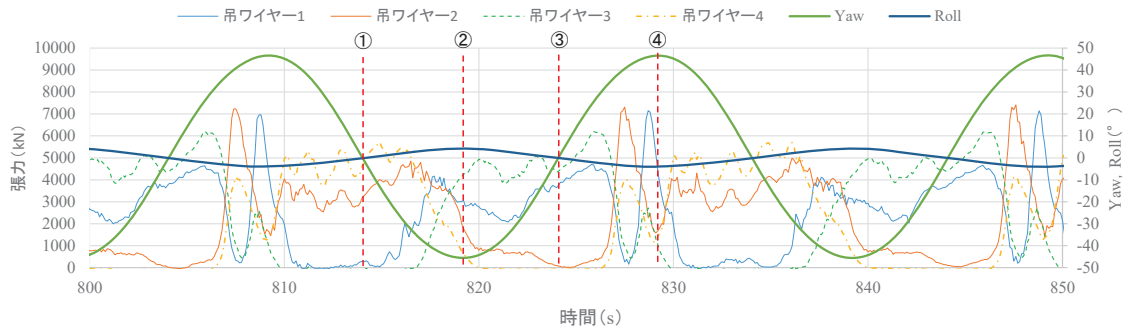


図5 吊ワイヤーに作用する張力と円柱吊荷の Yaw および Roll の時系列 (規則波, 周期: 10.0 s, 波向: 0°) (現地スケール)

るため、波向などの海象状況の変化を注視することが重要であるといえる。

円柱吊荷没水時には、周期 10 s~12 s の条件で吊荷の Yaw が卓越し、鉛直軸回りの激しい周期的な回転運動が見られた。円柱気中時やケーン気中時では、このような動揺は見られなかったことから、円柱吊荷が没水した際の動揺特性であるといえる。そこで円柱吊荷における Yaw の増大要因について考察を行う。図-5 に規則波周期 10 s, 波向 0° のケースにおける吊ワイヤー張力と Yaw および Roll の時系列データを示す。Yaw の各位相に対し、写真-3 中の①~④の順に沿って運動の概要を説明する。なお、吊ワイヤーの番号は、張力計の番号(写

真-2 参照) と対応している。

① 張力の時系列データに着目すると、吊ワイヤー2 と 4 の対角線上のワイヤーのみに張力が作用している。ここで吊荷ワイヤーの設置図面(図-6)から船体から時計回り(図中矢印方向)に回転モーメントが作用し、円柱吊荷の鉛直軸まわりの回転運動が助長されていることがわかる。

② 前述①の時計回りの回転運動が進行すると吊ワイヤー2 と 4 の張力は減少し、代わって吊ワイヤー1 と 3 の張力が励起されることにより反時計回りの回転モーメントが卓越する。これにより時計回りの回転が失速し、Yaw が極大値をとる。

③ 反時計回りの回転モーメントにより、図中矢印の方向に回転運動が生じる。

④ 前述①、②と反対の運動が生じる。すなわち反時計回りの回転運動の進行に伴う吊ワイヤー1と3の張力減少および吊ワイヤー2と4の張力増大、時計回りの回転モーメントの励起である。この間、長さの短い2本の補巻索(ワイヤー1と2)に瞬間的に大きな張力が交互に発生しているが、吊荷のYawへの影響は小さい。実験ビデオからはこの時、吊荷が若干振動することは確認されたが、その影響は軽微なものであると考えられる。

以降は①～④のような運動が繰り返される。

このようなYawが生じた要因について、以下の通り考察する。主巻索に対する補巻索の長さが短く、主巻索と補巻索ではクレーンから吊枠までのワイヤー角度が異なる。そのため、円柱吊荷に生じた回転方向の微小擾乱が、周期10~12sのケースで吊ワイヤー長さ、吊枠形状が有するYawの固有周期と共振したと考えられる。また、上記のケースにおいて、Yaw増大に併せて、円柱吊荷のRoll, Surge, Swayなども急激に増加していることがわかる。RollがYawと逆位相で推移していることから、Yawの卓越により、結果としてRollが連成して発生したといえる。一般的に、船体運動方程式において、左右対称な船の場合は、縦運動(Surge, Heave, Pitch)と横運動(Sway,

Roll, Yaw)は連成しない<sup>8)</sup>。しかし、本実験では前述の通り、主巻索と補巻索の長さが異なるため、円柱吊荷に非対称性が生じ、Yawが縦運動のモードとも連成したと考えられる。実際の海上工事では、タワー下端から吊り上げ、タワーに設置されたフレームで支持するような機構で吊施工を行った例がある(写真-4)。また、吊荷のYawを抑制するため、クレーンジブからタガーラインを設置することもある。このように洋上風車とスパー型浮体の連結施工を行う際は、吊手法によっては急激な動揺量増大のリスクがあるため、対策を講じる必要がある。

### (3) 単一方向不規則波と多方向不規則波の比較

円柱没水時、波向0°の単一方向不規則波と多方向不規則波における6自由度の最大値を表-5に示す。多方向不規則波中において、値の上昇が見られた箇所を赤字で示している。縦運動(Surge, Pitch, Heave)の動揺量を比べると、単一方向不規則波と多方向不規則波であまり大きな差は見られなかった。続いて、横運動(Sway, Roll, Yaw)の結果に着目すると、多方向不規則波の動揺量が大きくなっている。特に、多方向不規則波における吊荷のYawは、単一方向不規則波の3.6倍程度に増大している。このように方向スペクトルの有無によって横方向の動揺量が変化するため、実海域での施工の再現性を踏まえると、多方向不規則波での実験を行う必要性が示唆された。

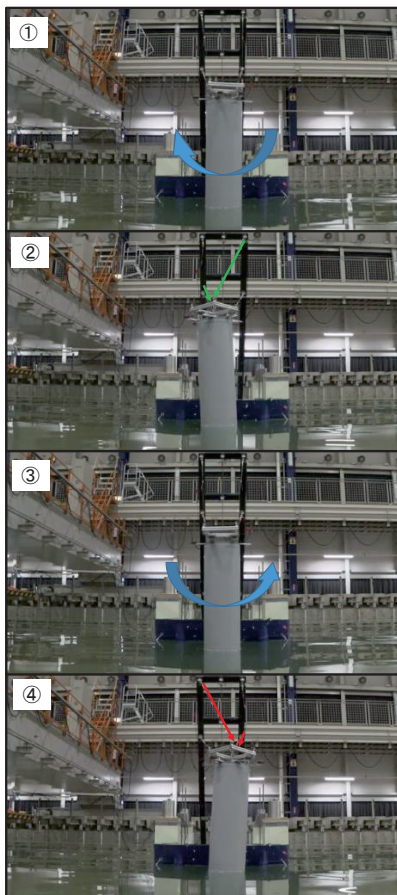


写真-3 円柱吊荷のYaw発生状況

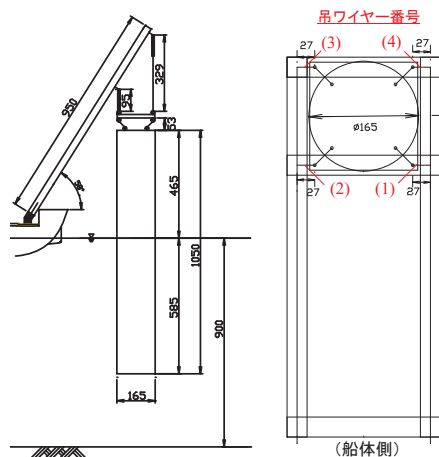


図-6 吊荷設置図面(単位:mm)  
(左:断面図, 右:平面図)

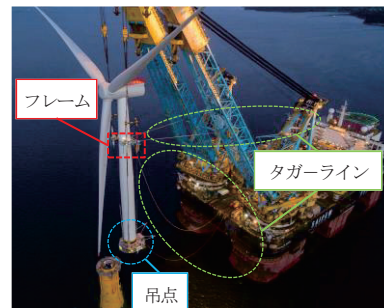


写真-4 Hywind Scotlandにおけるタワー吊施工の様子  
(<https://www.saipem.com/en/projects/hywind?referral=%2Fen%2Fprojects>)

表-5 不規則波における船および吊荷の6自由度の最大値

ケース	対象	Surge(m/m)	Sway(m/m)	Heave(m/m)	Roll(° /m)	Pitch(° /m)	Yaw(° /m)
一方向不規則波	船	0.20	0.08	0.35	0.19	1.02	0.07
	円柱吊荷	2.12	1.09	1.88	0.61	1.42	4.73
多方向不規則波	船	0.19	0.14	0.34	0.44	0.88	0.19
	円柱吊荷	2.49	3.33	1.81	1.74	1.77	17.14

また、多方向不規則波による挙動の線形応答性などについては、本実験では明らかにすることはできなかったが、方向関数の関数型や方向集中度パラメータなどを変更した検討を今後行う必要があると考えられる。

#### 4. おわりに

気中もしくは没水状態の矩形ケーソンおよび円柱スパー型洋上風車を起重機船で揚重施工する際、波浪によって生じる船および吊荷の動揺特性を把握するための水理模型実験を実施した。結論を以下に列記する。

- ・吊荷気中時では、特定の波周期に対して吊荷の並進運動が大きくなる共振が見られ、施工が危険となる波浪条件を確認できた。

- ・2つの波向に対する動揺量の比較より、斜め方向の入射波によって横方向の動揺量が誘起される現象を確認し、施工中の波向急変に伴う動揺特性の変化を評価した。

- ・円柱吊荷没水時においては、吊荷のYawが卓越するなど激しい動揺が観測され、洋上風車本体とスパー型浮体の連結施工時、急激な動揺量増大リスクのあることが示唆された。

- ・単一方向不規則波の結果と比べると、多方向不規則波では、横運動が大きくなることがわかった。深海域での施工状況をより忠実に再現するためには、多方向不規則波でも調査を行う必要性が示された。

#### 参考文献

- 1) 伊藤一教, 片倉徳男, 渡辺和明, 東江隆夫, 外山雅昭, 高久雅喜, 居駒智樹: 縮尺函体を用いた沈埋トンネル工法の検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.786-790, 2004.
- 2) 環境省: 平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書, pp.85-135, 2010.
- 3) 菊池由佳, 難波治之, 石原猛: 各種浮体形式の動揺特性に関する研究, 風力エネルギー利用シンポジウム, 第39回, pp.315-318, 2017.
- 4) 西田瑛太郎, 宇都宮智昭, 佐藤郁: 洋上風力発電のための円筒型浮体基礎の不規則波波浪動揺実験, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.135-140, 2008.
- 5) 西村優希, 宇都宮智昭: 大型起重機船を用いた風車洋上接合時の動揺特性, 土木学会論文集 A2(応用力学), vol.69, No.2, pp.809-820, 2013.
- 6) 河邊寛, 津田宗男, 宮崎哲史, 倉原義之介, 松田信彦, 諫山太郎: 吊荷が水中にある時の起重機船の波浪中の運動, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, 21号, pp.495-498, 2015.
- 7) 大坪和久, 石田圭, 佐藤宏, 長谷川賢太, 荒木元輝: クレーン作業中の多目的作業船と吊荷の波浪中連成運動評価, 日本船舶海洋工学論文集, 30号, pp.187-200, 2019.
- 8) 柏木正, 岩下英嗣: 船体運動 耐航性能編, pp.11-12, 成山堂書店, 2012.

(Received February 4, 2021)

(Accepted April 23, 2021)

### STUDY ON MOTION CHARACTERISTICS OF AERIAL AND SEMI-SUBMERGED SUSPENDED LOADS USING HYDRAULIC EXPERIMENT

Takuma KOBAYASHI, Kenya TAKAHASHI and Takeshi NISHIHATA

Hydraulic experiments have been executed in order to grasp the motion characteristics of a floating crane vessel with a hook load induced by waves during lifting operation of a rectangular caisson or column shaped spar type offshore wind turbine with the loads in the air or semi-submerged. Resonance to increase the parallel moving of the suspended loads is revealed for specific wave periods which indicates unsafe wave conditions on lifting operations. Comparison with the motions generated from different directional incident waves suggests that lateral moving is induced by the oblique directional incident waves, which enable to estimate the transformation of motion characteristics due to sudden wave direction change on construction sites. Intensive oscillations such as yawing of suspended loads are observed when the column load is semi-submerged, which implies the risk that abrupt increase of moving may occur on connecting the wind turbine body to spar type floating body. In directional random waves, lateral movement have been more increased by comparison the movement in unidirectional irregular wave.