

# スパー型浮体曳航時の動揺特性に関する研究

小林 拓磨<sup>1</sup>・西畑 剛<sup>2</sup>・廣井 康伸<sup>3</sup>・保木本 智史<sup>4</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: takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup> 五洋建設(株) 船舶機械部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)  
E-mail: Yasunobu.Hiroi@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup> 正会員 五洋建設(株) 洋上風力事業本部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)  
E-mail: Satoshi.Hokimoto@mail.penta-ocean.co.jp

浮体式スパー型洋上風車施工でのスパー型浮体曳航において、横波作用時ならびに回頭時の動揺特性を把握するための水理模型実験を行った。横波作用下の曳航では、波周期や曳航速度が増加するにつれて Roll 方向の動揺量が増加する傾向を確認した。回頭曳航実験では、曳航速度に対して回頭半径が小さい場合に遠心力によってスパーが外側に大きく Rolling する現象を確認し、施工時における曳航速度と回頭半径による動揺量の評価を行った。また、補助曳船の有無による違いに着目し、補助曳船がないケースにおいては、波周期が小さくなると波漂流力が大きくなるため、回頭できない現象を確認できた。そのため、回頭曳航施工における補助曳船の必要性を確認した。

**Key Words :** offshore wind turbine, transverse waves, turning towing, auxiliary tug, turning radius

## 1. はじめに

近年、有望な再生可能エネルギーの一つとして、洋上風力発電が注目されている。中でも、浮体式洋上風力発電は、着床式洋上風力発電に比べてエネルギーの賦存量が大きい<sup>1)</sup>ため、その導入が期待されている。そのため、浮体式洋上風車施工時の検討を行うことは重要であるといえる。例えば、写真-1 のような浮体式スパー型洋上風車の施工過程においては、浮体製作場所から外洋の Wind Farm (WF) 海域までの間スパー型浮体を曳航し、WF 海域で注水による立て起しを行った後に、風車を搭載する施工方法がある。異らはスパーの注排水による立て起しと横倒し時の挙動に関する水槽実験と解析を実施し<sup>2)</sup>、西村らは起重機船による風車ロータ接合時を対象とした動揺解析を行い、施工稼働率を検討した<sup>3)</sup>。このように浮体式洋上風車施工時の様々な検討は行われているものの、スパー曳航時の動揺特性に関する研究は実施されていない。スパー型浮体の水平曳航する際は、横波を受けた場合、浮体の Rolling が懸念されることに加えて、港内や半島迂回時などの回頭においては、様々な方向から波の影響を受けながら、安全に転回できる回頭半径と曳航速度を明らかにする必要がある。既往の曳航に関する研究は、安野ら<sup>4)</sup>や道前ら<sup>5)</sup>が水理模型実験を実施してい

るが、主曳船のみによる曳航実験を行っており、補助曳船の再現は行っていない。そのため、実施工を想定し、補助曳船も模擬した実験を行う必要がある。

そこで、本研究では、横波作用時ならびに回頭時の曳航実験を行い、スパー型浮体水平曳航時の動揺特性を抽出することを目的とした。直線曳航実験においては、波を進行方向の真横から作用し、波周期と曳航速度を変えた実験を実施した。回頭曳航では、波周期と曳航速度に加えて、回頭半径を変化させた実験を行い、安全に回頭できる回頭半径と曳航速度の関係について評価した。また、補助曳船がないケースでの回頭実験も行い、実施工上における補助曳船の必要性についても検討した。

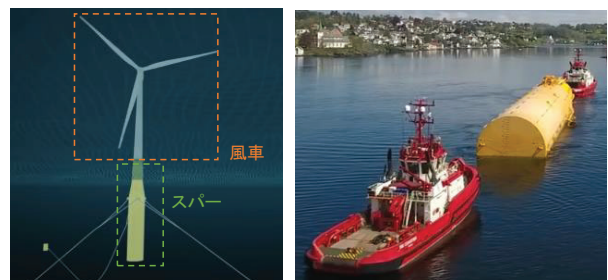


写真-1 スパー型浮体式洋上風車のイメージ(左)とスパー型浮体の水平曳航の様子(右)

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

## 2. 水理模型実験の概要

実験は平面水槽 ( $L=30\text{ m}, B=20\text{ m}, H=1.0\text{ m}$ ) を用いて、フルードの相似則に基づく 1/50 スケールで実施した。曳航は、水中に敷設したレールに沿って台車を一定速度で航行・回頭させる。水中の台車から気中に支柱を張り出し、スパー型浮体と曳航ロープで連結することで主曳船および補助曳船の牽引、係留を模擬する(写真-2)。浮体ならびに曳航ロープに関する諸元を表-1に、水深や波浪条件などの実験条件を表-2に示す。入射波は規則波で、波高 1.5 m とし、波周期は、スパーの固有周期付近 (Pitch: 6.0 s) に対する応答性を把握するために、5.0~9.0 s の範囲を 1.0 s 間隔で設定した。加えて、曳航速度のみの影響も評価するため、造波なしのケースも実施した。航路は図-1で示す通り、直線曳航と回頭曳航の2ケースを設定した。直線曳航では、スパーの進行方向に対して横から波を作用させた。回頭曳航は、スパー長  $R$  をパラメータとした回頭半径  $2R$  と  $3R$  に加え、補助曳船ありとなしのケースで実験を行った。曳航は造波開始からある程度時間が経過して、造波が定常状態に達した後に開始した。スパーの Rolling, Pitching の動揺量は、Nobby Tech 社製の 3 次元リアルタイムモーション計測システム (VENUS3D R) を用いて

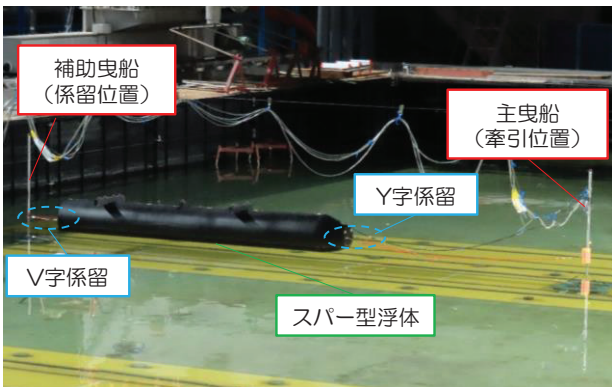


写真-2 実験概況

120 Hz の時間間隔で計測した。また、曳航ロープは浮体側の前後 2 点ずつに接続し、主曳船側は Y 字係留、補助曳船側は V 字で係留しており、それぞれの接続点に張力計を計 5 点設置し、曳航ロープに作用する張力も測定した。このような実験装置を用いて、曳船の波浪条件や曳航速度、回頭半径の違いによるスパー型浮体の挙動の変化について検討を行った。動揺量は、曳航開始から停止までの間における絶対値の最大値を抽出した。なお、座標系は、浮体中心部分を原点とした右手座標系とし、実験結果は、現地スケールに換算した数値を示す。

## 3. 実験結果

### (1) 直線曳航実験結果

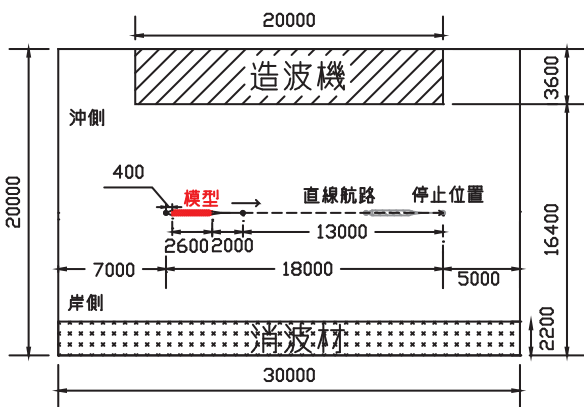
直線曳航実験における Rolling と Pitching を図-2に示

表-1 浮体ならびに曳航ロープの諸元 (現地スケール)

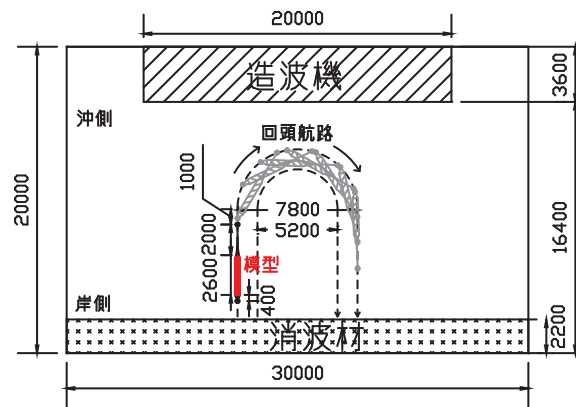
長さ $L$	130 m
直径 $\phi$	16.5 m
平均喫水 $d$	3.2 m
排水重量 $W$	3396.6 tf
曳航ロープ長さ	100 m (主曳船間) 40 m (補助曳船間)

表-2 実験条件 (現地スケール換算)

水深 (m)	40 m
波高 (m)	1.5 m
周期 (sec)	波なし, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0 (規則波)
曳航速度 (knot)	1.5, 3.0, 5.0 (*1knot=0.5 m/s)
回頭半径	2R, 3R (*R はスパーの長さ)
補助曳船	あり, なし (回頭曳航のみ)



(a) 直線曳航ケース



(b) 回頭曳航ケース

図-1 実験平面図 (単位: mm)

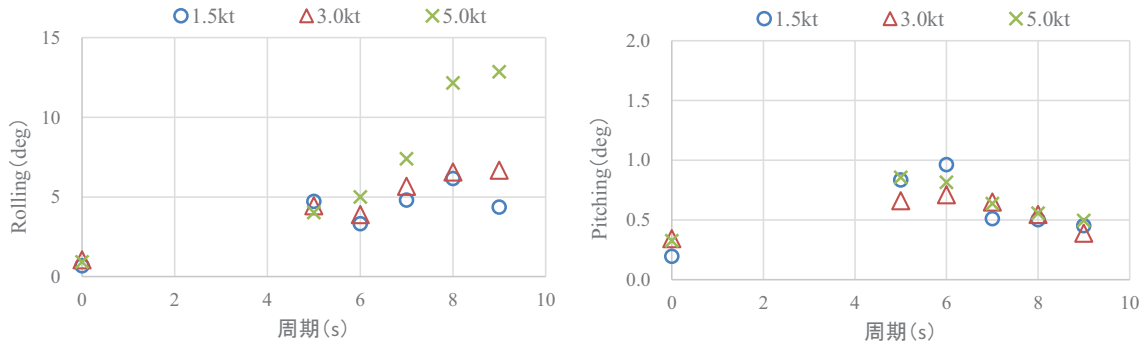


図-2 直線曳航時の動揺量 (左: Rolling, 右: Pitching)

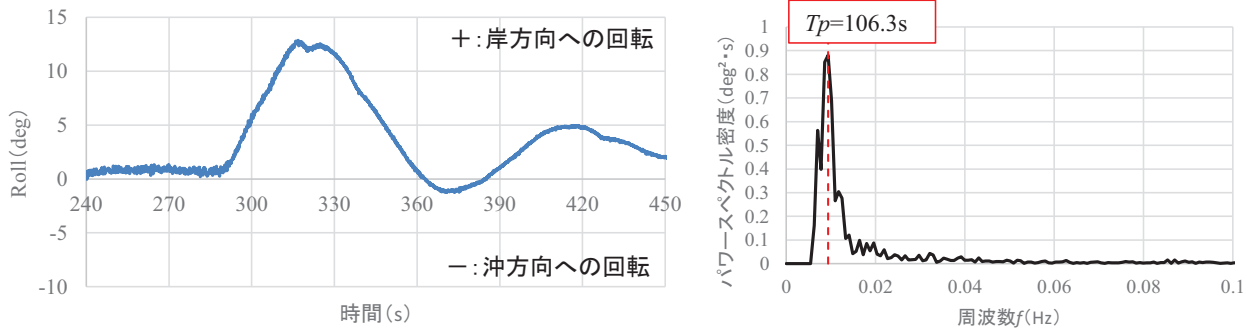


図-3 直線曳航時 (曳航速度 5.0 knot, 波周期 9 s) の Rolling の時系列 (左) ならびに Rolling のパワースペクトル密度 (右)

す。まず、Rolling に着目すると、波周期が長くなると Rolling が大きくなる傾向にあった。ここで、一例として、曳航速度 5.0 knot, 周期 9 s のケースにおける Rolling の時系列動揺量ならびにスペクトル解析結果を図-3 に示す。同図からスパーは波周期よりも長周期の 106 s 程度で動揺していることが分かる。スパー型浮体の係留系を含めた自由動揺試験より、前後の曳船で係留されたスパーの固有周期は、約 100 s であった。この結果を踏まえると、波による動揺よりも係留系の影響が卓越していたと考えられる。なお、その他のケースにおいても、80 s~100 s 程度で動揺しており、同様の傾向が確認された。

このように、係留系による長周期の動揺特性を有するため、より周期の長い波周期に対する応答性が高くなったことが考えられる。このように、曳航時に横波を受ける場合は、うねりなどの周期の長い波による Rolling の増加が懸念される。そのため、実施工時にはうねりなどの海象条件を注視する必要がある。続いて、Pitching に注目すると、各曳航速度において、周期 6 s で最も動揺量が大きくなっていることが分かる。ここでスパーの Pitching の固有周期が約 6 s であるため、周期 6 s の波周期に対する応答が高くなったと考えられる。

(2) 回頭曳航実験結果

回頭曳航時の補助曳船ありのケースにおける動揺量を図-4 ならびに図-5 に示す。結果から曳航速度の増加に

よって Rolling が大きくなっていることが分かる。特に、回頭半径 2R, 曳航速度 5.0 knot のケースにおいては、造波の影響によらず、スパーが円周航路の外側に向かって、約 90° 大きく傾斜する様子が確認された。これは、回頭半径に対する曳航速度が大きいため、外側に向かって浮体を回転させる大きな遠心力が作用したことに起因すると考えられる。このような Roll 方向の大傾斜によって、曳航ローブを取付ける治具に大きな荷重が作用する恐れがある。しかし、その一方で、曳航速度 5 knot でも、回頭半径を 3R まで大きくすることで、Rolling の最大値が 20° 程度まで低下している。これにより、回頭半径が Rolling に与える影響は大きく、港内や半島迂回時などの回頭施工を安全に実施するためには、十分な回頭半径を確保する必要があると言える。また、波周期による動揺量の違いに着目すると、直線曳航時とは異なり、より短い周期で動揺量が大きくなっている。Rolling の発生状況 (写真-3) より、浮体は沖側に回転していることが分かる。ここで、周期 5 s の波長  $\lambda=39.0$  m に対する浮体幅  $B=16.5$  m の比が 2.0 に近い (2.4 程度) ため、波長と浮体幅の比による波傾斜の影響が大きいことが要因として考えられる。

ところで、90° 程度まで大傾斜をすると、一般的な船舶では、復原力が消失し転覆することが考えられるが、本研究においては、浮体は元の姿勢に復元した。これは浮体が円筒形状であるため、浮心の位置が変化せず、転

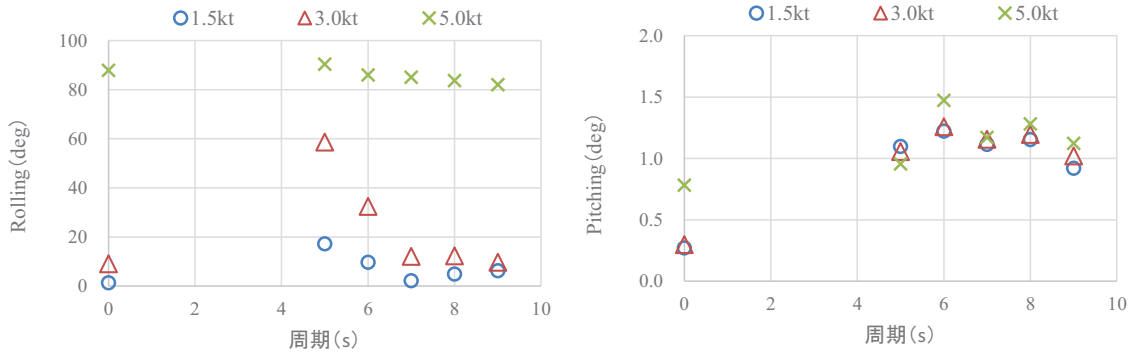


図-4 回頭曳航時(回頭半径2R)の動揺量(左:Rolling, 右:Pitching)

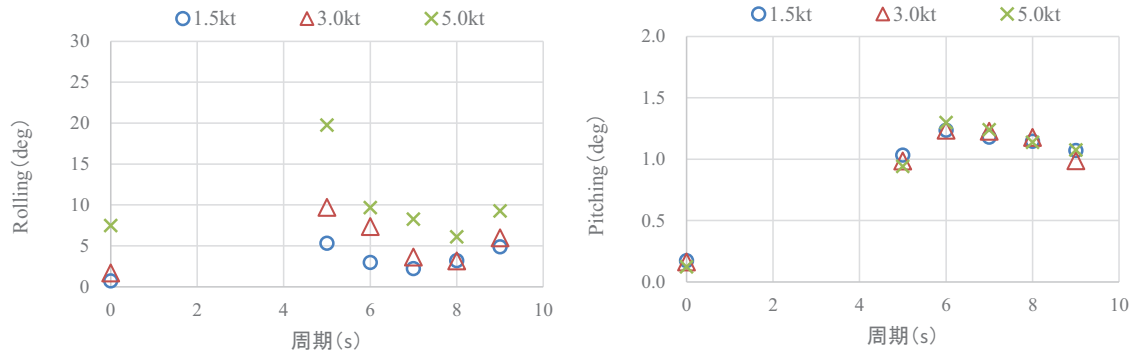


図-5 回頭曳航時(回頭半径3R)の動揺量(左:Rolling, 右:Pitching)

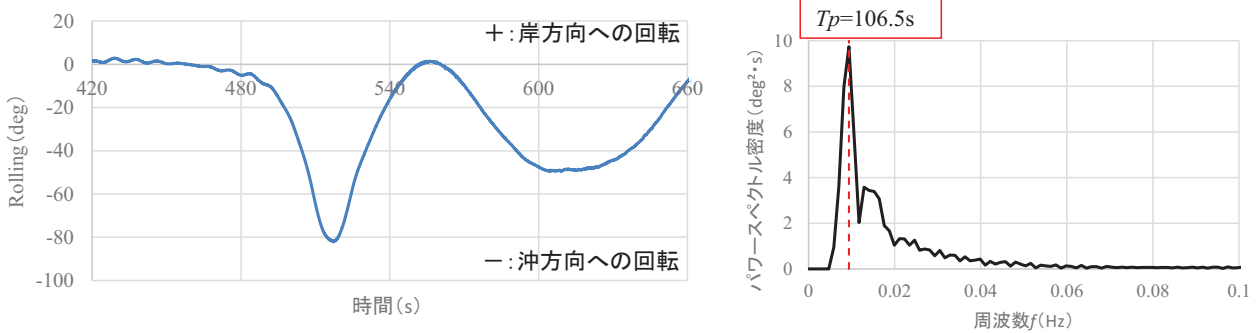


図-6 回頭曳航時(回頭半径2R, 曳航速度5.0knot, 波周期9.0s)のRollingの時系列(左)ならびにパワースペクトル密度(右)

覆が生じなかったと考えられる。続いて、Rollの復原力について、回頭半径2R, 曳航速度5knot, 波周期9sのケースにおける時系列結果ならびにスペクトル解析結果の一例(図-6)から考察を行う。Rollingの動揺周期は、106s程度であり、係留系を含めた固有周期と概ね一致している。このことから、係留系による復原力が卓越しており、浮体の動揺特性に影響を与えているといえる。そのため、このような横倒しの長大円筒形状の浮体曳航時における検討に際しては、係留系を含めた動揺特性を考慮する必要があることが示唆された。

また、船舶などが波浪の中を走る際は、波と出会う周期が変わるため、船体はこの出会い周期で揺れることになる。これは、ドップラー効果の一種であり、向波では周期が短くなり、追波では長くなる。そこで、波向 $\chi$ について、追波を $0^\circ$ , 向波を $180^\circ$ と定義すると、規則波

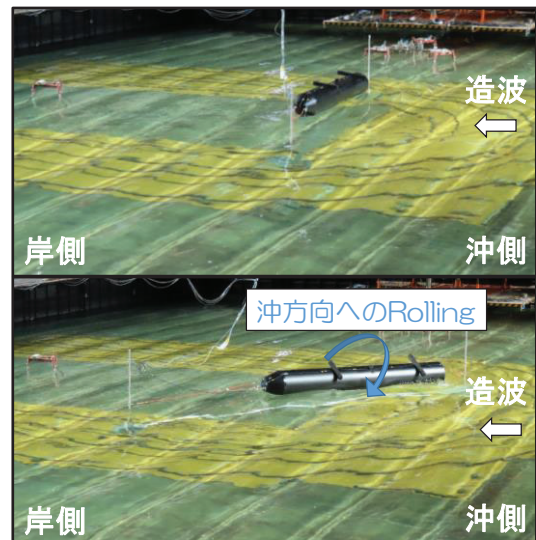


写真-3 Rollingの発生状況

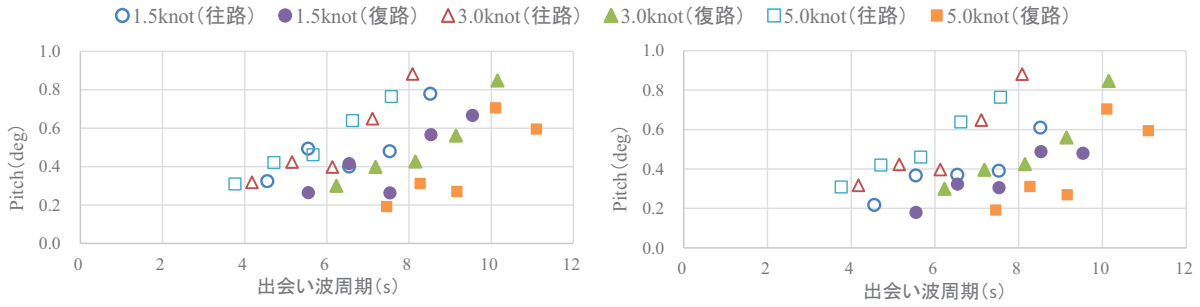


図-7 回頭ケースの (左: 回頭半径 2R, 右: 回頭半径 3R)

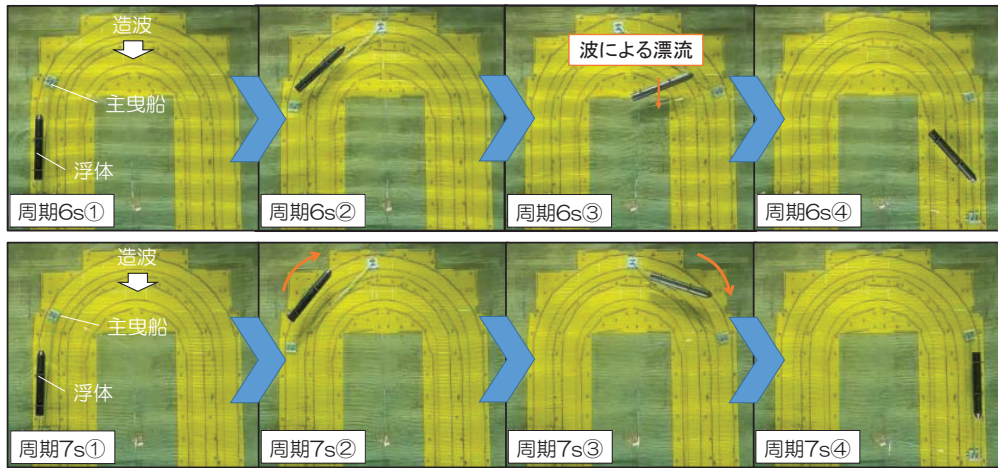


写真-4 補助曳船なしケースの回頭時 (3R, 3knot) の様子 (上段: 周期 6s, 下段: 周期 7s)

中の出会い周期 $T_e$ は、次式(1)となる<sup>9)</sup>。

$$T_e = \frac{\lambda}{C - V \cos \chi} \quad (1)$$

上式において、 $\lambda$ は波長 (m)、 $C$ は波速 (m/s)、 $V$ は船速 (m/s) である。(1)の関係式を用いて、回頭時の直進部分における回頭前を往路、回頭後を復路と定義し、回頭半径 2R, 3R における出会い波周期に対する Pitch 方向の動揺量を整理した (図-7)。回頭半径 2R, 3R の共通点として、波周期が長くなるにつれて Pitching が大きくなる傾向にある。また、同じ出会い波周期であっても、復路 (追波) より往路 (向波) の方が、動揺量が多い。これは、往路の場合、波の上流側に位置する主曳船とスパー型浮体のロープ長 100 m は、補助曳船とスパー型浮体のロープ長 40 m に比べて長く、曳航ロープによる拘束力が小さいことが原因だと推察される。このことから、曳航時における出会い波周期だけでなく、曳航ロープの長さによる拘束力についても考慮する必要がある。

最後に、補助曳船がないケースに関する考察を行う。補助曳船なしで回頭した場合、波周期と曳航速度の条件によっては、スパーが波に漂流されて回頭できなかった。各条件における回頭可否の結果を表-3 に示す。なお、回頭の可否は、回頭後にスパーが真っ直ぐになっていることを基準として目視によって判断した。傾向として、回頭半径、曳航速度ならびに波周期が大きくなるにつれて

表-3 補助曳船なしケースの回頭可否結果

回頭半径	曳航速度	周期 (s)	回頭可否
2R	1.5 knot	-	○
		5.0	×
		6.0	×
		7.0	×
		8.0	×
	3.0 knot	9.0	×
		-	○
		5.0	×
		6.0	×
		7.0	×
	5.0 knot	8.0	○
		9.0	○
-		○	
5.0		×	
6.0		×	
7.0		○	
8.0		○	
3R	1.5 knot	9.0	○
		-	○
		5.0	×
		6.0	×
		7.0	×
	3.0 knot	8.0	×
		9.0	○
		-	○
		5.0	×
		6.0	×
	5.0 knot	7.0	○
		8.0	○
		9.0	○
		-	○

回頭できていることが分かる。回頭可否の比較例として、回頭半径  $3R$ 、曳航速度  $3.0\text{ knot}$  の周期  $6\text{ s}$  と  $7\text{ s}$  における回頭時の様子を写真-4 に示す。周期  $6\text{ s}$  では、波によって漂流されたことにより回頭できていない一方で、周期  $7\text{ s}$  では回頭できていることが分かる。これは、短周期側で定常波漂流力が大きくなるため、その影響で回頭出来なかったと考えられる。補助曳船を付けた場合は、このような波による漂流を抑制するため、曳航ロープに最大  $2792\text{ kN}$  もの張力が作用した。以上より、波による漂流の影響があるため、実施工では回頭時に補助曳船が必要であることが示された。

#### 4. おわりに

浮体式スパー型洋上風車施工でのスパー型浮体曳航において、横波作用時ならびに回頭時の動揺特性を把握するための水理模型実験を行った。結論を以下に列記する。

- ・横波作用下の曳航では、係留系による動揺特性が確認され、周期が長い波で Roll 方向の動揺量が増加する傾向にあった。
- ・回頭曳航実験では、曳航速度に対して回頭半径が小さい場合に遠心力によってスパーが外側に大きく Rolling する現象を確認した。また、曳航速度  $5\text{ knot}$  でも回頭半径を  $3R$  まで大きくすることで、Rolling が大幅に減少し

ため、回頭時は回頭半径を十分に確保する必要性が示された。

・補助曳船の有無による違いに着目し、補助曳船がないケースにおいては、波周期が小さくなると波漂流力が大きくなるため、回頭できない現象を確認できた。そのため、回頭曳航施工における補助曳船の必要性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：着床式洋上風力発電導入ガイドブック，pp.24-26，2018.
- 2) 巽謙太郎，宇都宮智昭，佐藤郁：スパー型浮体注排水による立て起こし及び横倒し挙動に関する実験と解析，日本船舶海洋工学会講演会論文集，Vol.30，pp.681-684，2020.
- 3) 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.
- 4) 安野浩一郎，森屋陽一，山口和彦，今村正，坂井勝洋：長大ケーソン曳航時の動揺低減方策に関する研究，海洋開発論文集，vol.26，pp.825-830，2010.
- 5) 道前武尊，佐貫宏，今村正，坂井勝洋，古賀大三郎，丹羽強，伊藤勇志：異形長大ケーソン曳航時の挙動特性に関する研究，海岸工学論文集，vol.74，No.2，pp.1051-1056，2018.
- 6) 池田良穂，梅田直哉，慎燦益，内藤林：船体運動 耐航性能 初級編，p.4，成山堂書店，2013.

(Received February 3, 2022)

(Accepted May 9, 2022)

## STUDY ON MOTION CHARACTERISTICS OF TOWING A SPAR TYPE FLOATING BODY USING HYDRAULIC EXPERIMENT

Takuma KOBAYASHI, Takeshi NISHIHATA, Yasunobu Hiroi and Satoshi HOKIMOTO

Hydraulic model experiments were conducted to understand the characteristics of the motion of a spar-type floating tow under the action of transverse waves and during turning in the construction of a floating spar-type offshore wind turbine. In the case of towing under the action of transverse waves, the amount of roll motion tended to increase with longer period waves and higher towing speeds. In the turning towing experiment, we confirmed that the spar rolled outward significantly due to centrifugal force when the turning radius was small in relation to the towing speed, and evaluated the towing speed and turning radius during construction. In addition, we focused on the difference depending on whether an auxiliary towing tug is used or not, and confirmed that in the case without an auxiliary tug, the wave drift force becomes large when the wave period is small, and therefore, the tug cannot turn the head. Therefore, the necessity of an auxiliary tug for turning towing construction was confirmed.