浮体式洋上風力発電施設と船舶の衝突挙動に関する実験的研究

正会員 羽 田 絢* 正会員 中 條 俊 樹*
 二 村 正* 正会員 藤 原 敏 文*
 正会員 井 上 俊 司*

Experimental Study on Collision Behavior Between a Floating Offshore Wind Turbine and a Ship

by Ken Haneda, *Member* Toshiki Chujo, *Member*
 Tadashi Nimura Toshifumi Fujiwara, *Member*
 Shunji Inoue, *Member*

Summary

The collision between a floating offshore wind turbine (FOWT) and a ship is one of the most significant events that will be appeared in lifecycle of FOWTs, and it is especially important to correctly evaluate it. Although the numerical simulation like the FEM is assumed as the general analysis method of the collision phenomenon, there are several conditions which affect the collision phenomenon between them for example floater type, mooring and so on. In this study, a tank test was carried out to analyze the collision from the viewpoint of the energy balance and quantitatively evaluated the effects of various conditions. As a result of the tank test, it was found that floater type and ship speed have a large effect on the dynamic characteristics, which were likely to affect the energy contributing to deformation. On the other hand, it was clear that catenary mooring and wave have relatively little effect on the collision under certain conditions.

1. 結 言

洋上風力発電は現在世界中で注目されている発電技術である。日本国内では遠浅の沿岸が少ないことから、浮体式洋上風力発電（FOWT: Floating Offshore Wind Turbine）の導入が有効であると見込まれており、既に複数の実証事業¹⁾²⁾によりその実用性が確認された。一般的に、FOWTはライフサイクルが20年程度と見込まれており、その間に体験し得る様々なリスクについて評価し、必要に応じて対策を施すことが求められる。FOWTに発生し得る重大なリスクとして、浮体の沈没・全損や係留機能の喪失、それに伴う漂流などが挙げられ、それらの要因として特に影響の大きい事象が船舶との衝突である。FOWT、船舶間の衝突現象とその影響調査全般については、中條ら³⁾のFOWT損傷時復原性に関する検討で実施されており、本論文ではその過程で実施した衝突影響評価のための水槽模型試験について詳述するものである。

一般的に船舶・海洋工学において衝突現象を検討する場合、Minorsky⁴⁾の運動量理論に基づく評価や、有限要素法（FEM: Finite Element Method）を代表とした数値解析手法が用いら

れる。FEMでは、衝突箇所の形状、材料を考慮し、衝突過程における変形エネルギーの詳細な時間変化を導出することが可能となる。しかしながら、FOWTと船舶の衝突現象では、FOWTの係留手法、浮体形式、発電状態など、複数の要因がFOWT全体の動特性に影響し、衝突現象に作用する。効果的にFEM解析を実施するためには、動力学の観点に比重を置いた定性的な衝突現象の把握を行い、これらの要因の影響の現れ方を調査し、考慮すべき要素に優先順位をつける必要がある。

本研究では、模型試験を実施し、これらの要因の影響について調査した。模型試験では、実際に船舶模型とFOWT模型を衝突させ、衝突前後の物体挙動特性を把握するとともに、動特性の観点から事象を整理することによって、衝突前の全エネルギーが衝突後にどのような力学的エネルギーの配分として現れるかを調査した。また、動特性に影響する要素として、浮体形式、船舶排水量、波浪、係留に着目し、これらの要素が衝突現象に作用する定性的及び定量的な影響を調査した。模型は、剛体の船舶模型と、衝突箇所に弾性部材を採用したFOWT模型を用いた。本試験により、浮体形式と船舶排水量は動特性に大きく影響を及ぼす一方で、大きな定常外力が作用しない場合のカテナリー係留や、通常想定される範囲の波浪は力学的エネルギーの配分に大きく寄与しないことが明らかになった。また、これらのデータは別途実施された機構解析の検証データとしても使用された³⁾。

* 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
 海上技術安全研究所

2. 衝突事象のモデル化

FOWT と船舶の衝突現象について動特性の観点からモデル化した。

一般的に、衝突前の全エネルギーは、船舶の運動エネルギー E_0 として式(1)で記述できる。

$$E_0 = \frac{1}{2} M_s V_s^2 \quad (1)$$

M_s は付加質量を含む船舶の排水量、 V_s は船舶の進行速度である。

衝突現象を経たのちのエネルギー E_1 は、式(2)に示す複数のエネルギーに分解されると仮定した。すなわち、船舶の力学的エネルギー E_{SK} 、船舶外板の変形エネルギー E_{SD} 、FOWT の力学的エネルギー E_{FK} 、FOWT 外板の変形エネルギー E_{FD} 、そしてその他のエネルギー E_{delta} である。 E_{delta} には、熱、摩擦、音等のエネルギーが含まれる。

$$E_1 = E_{SK} + E_{SD} + E_{FK} + E_{FD} + E_{delta} \quad (2)$$

今回実施した模型試験では FOWT 側にのみ変形が生じ得る局所弾性模型を採用し、船舶側は剛体を採用したため、 E_{SD} は常にゼロを取り、 E_{FD} のみ値を持つこととなる。ただし、模型試験で外板相当部の変形量を厳密に導出することは困難であるため、 E_{FD} を直接評価することはできない。本試験では、 E_{FD} と E_{delta} を合わせて E_{other} として扱う。これを踏まえると、式(2)は式(3)の形に表すことができる。なお、 E_{other} は大半が変形に寄与したエネルギーと推察される。

$$\begin{cases} E_1 = E_{SK} + E_{FK} + E_{other} \\ E_{other} = E_{FD} + E_{delta} \end{cases} \quad (3)$$

力学的エネルギー E_{SK} 及び E_{FK} は式(4)に示すよう分解して整理した。

$$\begin{cases} E_{SK} = E_{SS} \\ E_{FK} = E_{FS} + E_{FP} + E_{FM} \end{cases} \quad (4)$$

船舶側は、船舶のサージ運動エネルギー E_{SS} のみを考慮した。他方、FOWT 側は、FOWT のサージ運動エネルギー E_{FS} 、FOWT 模型のピッチ運動エネルギー E_{FP} 、これに係留系をバネ要素ととらえた場合の係留系の弾性エネルギー E_{FM} の和として考慮した。

本衝突事象に関するモデル化により、実施試験結果は、 E_0 で正規化したときの E_{other} の比率や、各エネルギーの構成比率導出を目的として整理する。具体的な評価方法は 3.7 節に示す。

3. 模型試験

水槽模型試験の詳細を記述する。本試験は、2018 年に（国研）海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所の海洋構造物試験水槽で実施した。同水槽は長さ 40 m、幅 27 m で、ピストン式の造波装置と潮流発生装置を有する。本試験では水深を 1 m に設定した。

本水槽試験では、衝突時の荷重と、衝突前後の船舶及び FOWT の運動を計測し、運動量や運動エネルギーとして結果の整理を行う。航行船舶（衝突船）と停止船舶（被衝突船）の衝突現象については Minorsky の研究⁴⁾がよく知られており、運動量保存則に基づいた整理が行われている。この文献では、吸収エネルギー係数 K が式(5)として定義されている。これは、衝突船舶が衝突前に保有している運動エネルギーを 1 としたとき、衝突後に失われた（吸収された）エネルギーの割合を示すものである。ここで、 M_A は被衝突船の排水量、 M_B は衝突船の排水量、 dm は被衝突船の付加質量である。同式より、付加質量を考慮せず、船舶同士の質量比が 1 のとき吸収エネルギー係数が 0.5 を取ることがわかる。本試験では衝突船と FOWT の質量比を同等にあわせ、衝突後に残存する力学的エネルギーの割合の評価指標とした。

衝突に寄与する要素のうち、浮体形式、船舶排水量、係留、波浪の 4 点を考慮した。発電の有無については、今回は風車待機状態を想定するものとして、考慮の対象外とした。

$$K = \frac{M_A + dm}{M_B + M_A + dm} \quad (5)$$

3.1 試験模型

試験に使用した模型は、船舶模型 1 種と FOWT 模型 2 種である。先にも言及したが、船舶模型は変形を考慮しない剛体模型を用いた。FOWT 模型は、衝突箇所にも弾性部材を採用した局所的な弾性模型とした。

3.1.1 船舶模型

船舶模型の概要を Fig. 1 に、主要目を Table 1 に示す。縮尺は 1/100、垂線間長は 1.0 m である。標準時の船舶排水量は 10 kg であるが、バラストの調整によって 8, 12 kg を加えた 3 通りに変更できる。排水量を 8 kg に設定した際は、プロペラ位置の関係からわずかに船首上がりとなる。無線で制御可能な自航用モータを内蔵しており、異なる船速での自航が可能である。ただし、舵は非可動である。Fig. 1 に見られる 3 個のボールは、運動計測用のトラックボールで、直径 60 mm の発泡スチロール製である。

本模型は、船首部への作用荷重を計測することができる。Fig. 2 に船首部形状とロードセル位置の関係を、Fig. 3 には船体模型船首部のライン図を示す。船首部は独立しており、接続部品を介して模型本体に固定されたロードセル（日章電

機株式会社製、薄型 6 軸検力計 LMC-61293) と接続した。本試験では、Fig. 2 に示す船体前後方向に作用した荷重 F を船舶が FOWT から受けた荷重として定義した。

Fig. 1 Overviews of the model ship.

また、船首部形状は Fig. 2, Fig. 3 に示すように水線面上側（舳先）と下側（バルバスバウ）がそれぞれ同程度突出した形状となっている。Fig. 3 は船首部の断面形状を示す。SS10 (Square station) から船首先端まで 4.5 cm (実機 4.5 m)、断面間隔は 1.8 cm (実機 1.8 m) である。実際の衝突現象は船体や FOWT の動揺により総突箇所は多様に分布すると考えられるため、衝突挙動が偏らないように、突出長さを揃えた。

Table 1 Principal properties of the model ship.

Item	Scale model	Actual
Scale ratio	1/100	—
Draft (D _{sip} =10 kg)	0.085 m	8.5 m
Length between perpendiculars	1.000 m	100 m
Breadth	0.195 m	19.5 m
Depth	0.145 m	14.5 m
Displacement	8.0 kg	8,000 ton
	10.0 kg	10,000 ton
	12.0 kg	12,000 ton

Fig. 2 Loadcell layout in the model ship (Disp.=10 kg).

Fig. 3 Body plan of the model ship.

3.1.2 FOWT 模型

本試験では、被衝突 FOWT として 2 種類の浮体形式（セミサブ型、スパー型）を想定した。FOWT 模型の概要を Fig. 4, Fig. 5 に、それらの主要目を Table 2, Table 3 に示す。搭載風車として 5MW 風車を想定したが、本試験では風荷重の影響は考慮しないため、ロータは模擬せず、タワーのみ模擬した。タワー部は両浮体で共通で、直径 40 mm、板厚 1.5 mm のアルミ製中空円柱で模擬し、タワー中央及び先端に運動計測用のトラックボール（直径 60 mm の発泡ボール）を 3 か所設置した。Fig. 4, Fig. 5 では、側面図にのみトラックボールの設置状況を描画した。

セミサブ型 FOWT 模型は型深さ 0.3 m、喫水 0.2 m である。直径 0.12 m のコラムを正三角形に 3 つ配置し、そのうちのひとつにタワーを接続した。なお、タワー接続コラムが被衝突コラムである。各コラム下部には直径 0.2 m のフーティングを設置した。スパー型 FOWT 模型は、直径 0.12 m の単純円筒形状で、型深さ 0.9 m、喫水 0.8 m である。各浮体は、厚さ 5 mm のアクリルで製作し、コラム内部に重量、重心調整用の真鍮製バラストを搭載した。係留接続高さは両者で統一しており、水線面下 0.175 m の位置とした。衝突部の詳細については次項で述べる。

Fig. 4 Overview of the semi-submersible FOWT model.

Fig. 5 Overview of the spar FOWT model.

Table 2 Principal properties of the semi-submersible FOWT.

Item	Scale model	Actual
Scale ratio	1/100	—
Center of gravity (KG)	0.100 m	10 m
Gravity metacenter (GM)	0.740m	74 m
Draft	0.200 m	20 m
Freeboard	0.100 m	10 m
Fairleader depth below waterline.	0.175 m	17.5 m
Tower length	0.755 m	75.5 m
Column dia.	0.120 m	12 m
Distance between columns	0.600 m	60 m
Footing height	0.050 m	5 m
Footing diameter	0.200 m	20 m
Radius of gyration (Pitch)	0.32 m	32 m
Displacement	10.34 kg	10,340 ton

Table 3 Principal properties of the spar FOWT.

Item	Scale model	Actual
Scale	1/100	—
Center of gravity (KG)	0.340 m	34 m
Gravity metacenter (GM)	0.06m	6 m
Draft	0.800 m	80 m
Freeboard	0.100 m	10 m
Fairleader depth below waterline	0.175 m	17.5 m
Tower length	0.755 m	75.5 m
Column diameter	0.120 m	12 m
Radius of gyration (Pitch)	0.59 m	59 m
Displacement	9.01 kg	9,010 ton

3.1.3 浮体模型衝突箇所

Fig. 6 は、衝突直前の船舶と FOWT を図示したものである。FOWT 模型の被衝突部の詳細に加えて、衝突箇所の相対位置関係を示す。ただし、係留は省略した。図中の FOWT 模

型には、緩衝材取付位置を示した。緩衝材は、作用した力積を維持しつつ最大荷重を低減させ、船舶模型及び内部に設置したロードセルの破損防止を目的としたものであり、実機との相関について考慮したものではない点に注意が必要である。被衝突コラム外壁面に、厚さ 5 mm のイソブチレン系ジェルマットを貼り付け、そのさらに外側にファスナー付きプラスチックバックに入れた厚さ 10 mm のスポンジを設置した二重構造である。大きさは高さ約 0.2 m、幅約 0.1 m で、衝突船舶の高さ全域を覆うようにした。

同じ Fig. 6 を用いて FOWT 模型と船舶模型の衝突時の位置関係を示す。図中の motion reference point は、船舶・FOWT の運動参照点であり、模型挙動はこの点を基準に整理した。両者の座標が一致したときに、2 物体が衝突したとみなす。また、本試験の衝突は、同図上面図のように船舶が衝突コラムの中心に衝突することを想定した。

Fig. 6 Enlarged view of the model ship bow and collision column of the model FOWT.

3.1.4 係留系

FOWT 模型の係留配置詳細を Table 4 及び Fig. 7 示す。係留索は 3 本で、各係留索間の角度が 120 deg になるように均等に配置した。船舶の進行方向と平行に設置した係留索を 1 番として、時計回りに番号を振った。係留索は空中重量 50 g/m のステンレスチェーン 1 種を用いたカタナリー係留とし、ブイやシンカーは使用しなかった。

Table 4 Principal properties of the experimental mooring setting.

Item	Scale model	Actual
Number of lines	3	3
Weight in air	50 g/m	500 kg/m
Length of mooring lines	5.3 m	530.0 m
Height from the anchor	0.825 m	82.5 m
Horizontal length from the anchor		
M1	5.0 m	500.0 m
M2	5.05 m	505.0 m
M3	5.075 m	507.5 m

アンカーは、フェアリーダから水平距離 5.0 m、鉛直距離 0.825 m 離れた位置に設置した。本試験では、係留索の展開状態に応じた影響を調査するため、3 本のチェーンの展開半径を 3 通りに変更した。基準となる状態を M1、それよりも展開半径が 50 mm 伸びた状態を M2、M1 から展開半径が 75 mm 伸びた状態を M3 として定義した。各状態で、アンカーとフェアリーダ間の鉛直距離に変更はない。

Fig. 7 Mooring layout of the semi-submersible FOWT model.

3.2 模型配置

模型の全体配置の様子を Fig. 8 から Fig. 10 にかけて示す。Fig. 8 はセミサブ型 FOWT 模型を設置した場合の配置，Fig. 9 はスパー型 FOWT 模型を設置した場合の配置である。紙面の都合上、係留は一部省略した。また、座標系を併せて示す。座標原点は、FOWT の運動参照点の初期位置として定義した (Fig. 6)。船舶模型は、船尾が原点から X 方向に -5 m の位置から進行を開始した。

Fig. 8 Experimental setup with the semi-submersible FOWT model.

模型の他に、進路安定用ガイドレールを設置した。このガイドレールは、4.0 m の直線部と、1.0 m のハの字部から構成される金属板である。原点から X 方向に -5.3 m の位置を始点として X 軸に沿って設置し、船舶模型の意図しない方向変換を修正する役割を果たした。原点の 1.3 m 手前からはハ

の字に開き、衝突後の船舶挙動を阻害しない。スパー型 FOWT 模型を設置した場合の試験の様子を Fig. 10 に示す。

Fig. 9 Experimental setup with the spar FOWT model.

Fig. 10 Experiment scene with the model ship and the spar FOWT model.

3.3 試験方法

具体的な試験手順を以下に示す。試験 1 状態につき、基本的に 20 回の衝突試験を実施した。本試験では Fig. 6 に示すように模型同士が正面から衝突する状態を想定したが、制御できない微小な影響によって衝突の仕方が変動することを考慮し、統計的な傾向を獲得するためである。ただし、試験項目によっては実施回数を変更した。

1. 船舶模型を初期位置で固定し、プロペラ回転数が規定値に達するよう操作する。
2. プロペラの回転が安定するまで状態を維持する。
3. 船舶模型の自航を開始する。
4. FOWT 模型との衝突直前にプロペラの回転を停止し、衝突時に船舶模型が推力を持たないようにする。
5. 船舶模型と FOWT 模型の衝突後、十分に時間が経過したのちに船舶模型を回収する。

3.4 計測項目

計測項目の詳細を Table 5 に示す。船舶模型、FOWT 模型

の運動は、光学式カメラを用いて計測した。Fig. 1 等にしたトラックボールの位置を取得し、Fig. 6 に示した運動参照点を基準とする X 方向（サージ）運動及び Y 軸まわり（ピッチ）運動に換算して利用した。係留張力はフェアリーダ側に取り付けた歪ゲージで計測した。各模型の運動と係留張力は光学式カメラの性能から 50 Hz で収録した。他方、船舶模型内部に設置したロードセル荷重は、事前に実施した簡易試験の結果をもとに 5 kHz で収録した。

Table 5 Measurement item in the test.

Item	Unit	Remark
Motion of the ship	mm	50 Hz, 2DOF analysis
Motion of the FOWT	mm	50 Hz, 2DOF analysis
Mooring line tension	N	50 Hz
Load	N	5 kHz

3.5 試験条件

試験条件の一覧を試験記号とともに Table 6 に示す。緒言に述べたように、本試験では浮体形式、船舶排水量、波浪、係留の 4 項目をパラメータとして設定した。浮体形式は試験記号の頭文字で標記し、セミサブ型 FOWT 模型を用いたものを”SS_”，スパー型 FOWT 模型を用いたものを”SP_”とした。その他の条件は A から E を用いて試験記号の末尾に示す。A は平水中、B は規則波中、C は不規則波中での衝突試験を示す。また、D は船舶模型の排水量を変更しての衝突試験、E は係留状態を変更しての衝突試験である。

波条件の詳細を Table 7 に実スケールと併せて示す。波は規則波、不規則波の両方を、各 1 種ずつ選択した。波向きは、いずれの場合も船舶進行方向と同一方向とした。風車待機状態を想定しているため、通常海象よりは厳しく、1 年再現よりは穏やかな程度の条件を設定した。具体的な値は文献⁵⁾を参考に規則波は周期 1.0 s、波高 3.0 cm とし、不規則波はピーク波周期 1.0 s、有義波高 3.0 cm とした。不規則波スペクトルには、JONSWAP スペクトル⁶⁾を採用した。

Table 6 Experimental conditions.

Test case	Floater	Wave	Other
SS_A	Semi-sub	—	—
SS_B	Semi-sub	Regular	—
SS_C	Semi-sub	Irregular	—
SS_D	Semi-sub	—	Ship displacement (3 conditions)
SS_E	Semi-sub	—	Mooring setting (3 conditions)
SP_A	Spar	—	—
SP_B	Spar	Regular	—
SP_C	Spar	Irregular	—

Table 7 Regular and irregular wave conditions.

Wave type	Item	Scale model	Actual
Regular wave	T	1.0 s	10.0 s
	H	0.03 m	3.0 m
Irregular wave	Tp	1.0 s	10.0 s
	Hs	0.03 m	3.0 m
	γ	2.0	2.0

衝突船舶の初期速度について、Table 8 に示す。船体速度はモータの回転数を調整し、3 通り用意して実施したが、厳密に同一回転数を設定することは困難であったため、参考値となる。また、規則波試験(SS_B, SP_B)及び係留変更試験(SS_E)では Middle speed のみ実施した。

Table 8 Representative ship speeds in the tank test.

Speed level	Motor speed [rpm]	Model speed [m/s]	Actual speed [knot]
Low	1500	0.2	3.9
Middle	2000	0.3	5.8
High	2500	0.4	7.8

3.6 試験結果

3.6.1 基礎特性試験結果

はじめに、模型基礎特性の計測結果を紹介する。船舶模型のロール固有周期を Table 9 に、セミサブ型 FOWT 模型の主要固有周期を Table 10 に、スパー型 FOWT 模型の固有周期を Table 11 に示す。また、セミサブ型 FOWT 模型の係留状態を変更した際の固有周期と、導出したサージ方向の復原力を Table 12 に示す。なお、この係留復原力 k の導出は、式(6)を用いてサージ運動の固有周期 T と付加質量 ma 、模型排水量 m を代入して導出した。付加質量は流体力解析プログラム、WAMIT⁷⁾の計算結果を用いて導出し、無限周波数のときの値を利用した。

Table 9 Roll natural periods of the ship.

Displacement [kg]	Scale model [s]	Actual [s]
8.0	1.78	17.8
10.0	1.38	13.8
12.0	1.03	10.3

Table 10 Natural periods of the semi-sub FOWT.

Mode	Scale model [s]	Actual [s]
Surge	7.14	71.4
Heave	1.41	14.1
Roll	1.91	19.8
Pitch	1.77	18.4

Table 11 Natural periods of the spar FOWT.

Mode	Scale model [s]	Actual [s]
Surge	8.28	82.8
Heave	1.72	17.2
Roll	3.47	34.7
Pitch	3.42	34.2

Table 12 Surge natural period and stiffnesses of the semi-submersible FOWT in several mooring conditions.

Condition	Natural period [s]		Stiffness [N/m]	
	Scale model	Actual	Scale model	Actual
M1	7.14	71.4	12.4	12.4×10^4
M2	5.14	51.4	23.9	23.9×10^4
M3	3.98	39.8	39.8	39.8×10^4

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m + ma}{k}} \quad (6)$$

Table 9 より、船舶模型の排水量とロール固有周期の関係を確認すると、排水量が小さくなるほどロール固有周期が長くなることが判明した。これは、排水量の低下に伴って使用バラスト量が軽減し、重心が上昇し、復原力が低下したためである。次に、Table 10 と Table 11 から浮体形式の差異について確認する。セミサブ型 FOWT とスパーク型 FOWT で特に大きな差異が現れるのはピッチ固有周期で、セミサブ型が 1.7 s であることにに対し、スパーク型が 3.4 s と、およそ周期が倍になった。また、Table 12 から係留変化の影響に着目すると、M1 と M3 状態を比較したときに、M3 の方は M1 に対してサージ固有周期が半分近くになり、復原力が 3 倍程度になったことが確認できる。今回設定した M3 の係留配置は、カテナリー係留としては非常に復原性能が強い状態といえる。

3.6.2 衝突時応答例

試験結果の一例として、衝突過程の時系列を Fig. 11 から Fig. 13 に示す。Fig. 11 はセミサブ型 FOWT 模型と船速を Middle speed に設定した船舶模型が衝突する様子、Fig. 12 はスパーク型 FOWT 模型と船速を Middle speed に設定した船舶模型が衝突する様子、Fig. 13 はセミサブ型 FOWT 模型と船速を High speed に設定した船舶模型が衝突したときの様子である。それぞれ、船舶模型で計測した衝突時の荷重、各模型のサージ変位、各模型のピッチ変位、係留索 1 番 (Fig. 7 中の Line 1) の係留張力の 4 つのグラフを含む。時間軸は、ロードセル荷重が最大値を迎えた時間を基準に描画した。

衝突現象の起きた時間をロードセル荷重が発生した時間として定義し、 t_0 を衝突開始時間、 t_1 を衝突終了時間とした。加えて、衝突開始から 0.5 s 前を t'_0 、衝突終了から 0.5 s 後を

t'_1 と定義し、衝突前後の各 0.5 s 間を衝突前状態、衝突後状態とした。以降、衝突前を状態#01、衝突中を状態#02、衝突後を状態#03 とする。

Fig. 11, Fig. 12 から、Middle speed での応答比較を行う。衝突時間は、概ね 0.1 s 程度である。この間、瞬間的な係留張力の増加も現れた。また、浮体形式によって荷重の最大値に大きな差異があり、セミサブ型との衝突時は、スパーク型との衝突時に比して荷重が数倍になることが判明した。衝突後は、船舶及び FOWT の挙動にも大きな差異が現れた。FOWT 挙動から見ると、セミサブ型は衝突後わずかにサージ変位が発生したのみであるのに対し、スパーク型は大きなピッチ運動が発生したことが確認できる。この差異は、ピッチ運動の生じやすさであり、浮体の有する復原性能と衝突荷重の作用位置の双方が影響したと推察される。Table 2, Table 3 より浮体の GM はスパーク型が 0.06 m、セミサブ型は 0.74 m と、両者で 2 桁の差がある。また、スパーク型は衝突位置が重心から大きく離れているのに対して、セミサブ型は重心近傍の衝突であった。この 2 要素から、スパーク型 FOWT が大きいピッチ運動を示す状況にあったと思われる。また、船舶挙動を見ると、スパーク型と衝突した場合は、FOWT ピッチ運動の発生によって船舶の進路が開くため、進行を続けるのに対し、セミサブ型との衝突後はほぼ停止した様子が確認できる。他方、2 浮体で共通した挙動として、状態#3 に降に、浮体のサージ変位量及び係留張力が最大値となることが明らかになった。通常のカテナリー係留では平衡点近傍での復原力が小さいため、衝突時よりも、サージ大変位時の張力の方が大きいことが判明した。

Fig. 11 と Fig. 13 から船速の差異に着目すると、衝突後の船舶挙動に影響が出ており、船速が高い方が衝突後も速度を維持していることが確認できる。他方で、衝突時の荷重や係留張力に大きな差はない。

Fig. 11 Time history of the experiment with the semi-submersible FOWT (SS_A, Middle speed, Disp.=10 kg).

Fig. 12 Time history of the experiment with the spar FOWT (SP_A, Middle speed, Disp.=10 kg).

Fig. 13 Time history of the experiment with the semi-submersible FOWT (SS_A, High speed, Disp.=10 kg).

3.7 解析方法

3.6節で定義した状態#01及び状態#03の0.5 s平均値の速度、変位に加えて、状態#02の衝突荷重時系列変化を以降の解析に使用する。本来であれば、速度から運動エネルギー推移の時系列変化を提示する想定であったが、3次元挙動計測機器の精度が不十分であったため、衝突前後の変位、速度は平均値を用いて解析した。状態#01及び状態#03の区間設定は、速度が概ね安定した領域として選択した。他方で、状態#03でサージ変位が上昇し続けていたことは先のグラフで確認した通りであり、変位を用いた評価は若干過大評価となっている可能性がある。

3.7.1 運動量と力積の比較

本試験の解析方法として、運動量と力積に着目した方法を述べる。船舶とFOWT間で作用した力積を、計測したデー

タから2通りの方法で取得した。1つ目は衝突船舶の運動量変化に着目する手法で、衝突後(状態#3)と衝突前(状態#1)の各区間における、衝突船舶サージ速度の0.5 s平均値を用いて各状態の運動量を定義し、その差分から力積を定義した。2つ目は船舶模型に搭載したロードセルで計測した荷重 F (Fig. 2)を状態#2の時間で積分したものとして定義した。各定義式を式(7)に示す。理想的には運動量変化と力積が一致するため、両者を比較することで計測時に取り逃した速度の割合を確認することができる。

$$\begin{cases} I = \Delta m_s v_s = m_s \bar{v}_{s3} - m_s \bar{v}_{s1} \\ I = \int_{t_0}^{t_1} F(t) dt \end{cases} \quad (7)$$

このとき、 m_s は船舶模型の排水量、 $\bar{v}_{s1}$ は状態#01における船舶速度の平均値、そして、 $\bar{v}_{s3}$ は状態#03における船舶速度の平均値である。

3.7.2 エネルギー収支による整理

本試験の解析方法として、系全体のエネルギー収支に着目した手法を述べる。2章に示したとおり、今回は力学的エネルギーに着目した整理を実施し、変形に寄与するエネルギーは、その他のエネルギーとして間接的に評価した。ここでは、衝突前後の力学的エネルギーの定義を示す。まず、衝突前のエネルギー E_0 は、船舶模型のサージ方向運動エネルギーとして式(8)に示される。

$$E_0 = \frac{1}{2} (m_s + m_{a_s}) \bar{v}_{s1}^2 \quad (8)$$

ここで m_{a_s} は船舶模型の付加質量であり、今回は箱型浮体の数値解析結果⁸⁾を参考に $0.1m_s$ と定義した。他方、衝突後の力学的エネルギー E_1 は、2章を踏まえて最終的に式(9)として示すことができる。分解したエネルギーの詳細を式(10)に示す。

これらは前述のとおり、船舶模型のサージ運動エネルギー E_{Si} 、FOWT模型のサージ運動エネルギー E_{FS} 、FOWT模型のピッチ運動エネルギー E_{FP} 、そして、係留系をバネ要素ととらえた場合の係留系の弾性エネルギー E_{FM} である。

$$E_1 = E_{Si} + E_{FS} + E_{FP} + E_{FM} + E_{other} \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_{Si} = \frac{1}{2} (m_s + m_{a_s}) \bar{v}_{s3}^2 \\ E_{FS} = \frac{1}{2} (m_F + m_{a_F}) \bar{v}_F^2 \\ E_{FP} = \frac{1}{2} (I_F + I_{a_F}) \bar{\theta}_F^2 \\ E_{FM} = \frac{1}{2} k_M \bar{x}_F^2 \end{cases} \quad (10)$$

また, m_F は FOWT 模型排水量, ma_F は FOWT 模型のサージ方向付加質量, $\bar{v}_F$ は状態#03 の FOWT 模型サージ速度平均値, I_F は FOWT 模型ピッチ方向慣性モーメント, Ia_F は FOWT 模型ピッチ方向付加慣性モーメント, $\bar{\theta}_F$ は状態#03 の FOWT 模型ピッチ角速度平均値, k_M は FOWT 係留系サージ方向復原力 (Table 12), そして $\bar{x}_F$ は状態#03 の FOWT 模型サージ平均変位を示す.

本試験の解析では, 1 条件に対して複数回の試験を実施した. E_{other} の導出においては, 同一条件の試験結果を全て利用して式(11)の形で定義した. ここで, バー付きの表記は時間平均値ではなく, 各試行結果の平均値をとったことを意味する.

$$E_{other} = \bar{E}_0 - (\bar{E}_{Sl} + \bar{E}_{FS} + \bar{E}_{FP} + \bar{E}_{FM}) \quad (11)$$

3.8 解析結果

3.8.1 運動量と力積

運動量と力積に着目した解析結果を Fig. 14 に示す. これは横軸に運動量変化, 縦軸に運動量変化で正規化した力積を示すものである. 理想的には正規化した運動量変化が常に 1 を示すため, 補助線を追加した. 同図にはセミサブ型とスパ型の結果を併せて示した. これより, 浮体形式によらず正規化した力積が 0.8 から 1.0 の範囲にあり, 式(7)の関係と照らし合わせることで, 十分に妥当性のある試験を実施できたことがわかる.

Fig. 14 Relationship between normalized impulse and change in momentum with floater type changing.

また, 船舶の運動量変化量によらず, 正規化した力積がおよそ一定の値をとっていることが確認できる. 一部スパ型との衝突では 0.8 を大きく下回る点が目立つが, これは船舶模型が FOWT 模型の正面に衝突せず, 側面をかすめたために荷重が過少評価になったことが原因と推察できる.

浮体形式の違いによる差異を確認すると, セミサブ型の方が正規化した力積がほぼ 0.9 付近に集中している一方で, スパ型の方は大きく離れたものを除いても 0.8 から 1.0 にか

けて分布しており, かつ平均値も若干小さいことがわかる. この理由として, 衝突後に多くの運動エネルギーが残るスパ型との衝突では, サージ運動だけではなく, 本検討では評価しないスウェイ運動やヨー運動が現れたことが原因と推察できる.

Fig. 15, Fig. 16 は, 横軸には模型船舶の初期運動量 $m_s \bar{v}_{s1}$ を, 縦軸には力積を示したものである. 衝突後に船舶が停止し, すべて力積として作用したとき, 傾き 1 の直線となるため, 補助線として示す.

Fig. 15 Relationship between impulse and initial momentum with floater type changing.

Fig. 15 は, Fig. 14 の表示形式を変更したものであり, 浮体形式変更に伴う影響を示している. セミサブ型の方が初期運動量に対する力積の割合が大きく, スパ型の方がその割合が小さい結果となった. すなわち, 衝突後の船舶挙動がほぼ残らないセミサブ型との衝突と, 大きく残るスパ型との衝突時挙動の差異を定量的に示したものである. また, 浮体形式毎に概ね一定の直線上に分布したことが確認でき, 各試験は定性的な傾向を取得できたといえる.

Fig. 16 は, 波浪中でのセミサブ型 FOWT との衝突結果について示したものである. 平均値は波浪有無によらず大きく変動しない一方, 波浪の存在によって結果が広範に分布することが確認できる. 波浪は衝突時の船舶・FOWT 間相対速度に作用し, 衝突時力積を変動させる効果があると推察できる. この変動を定量的に評価するため, 平水中試験結果から入力運動量と力積に関する近似直線を作成し, 近似直線まわりの標準偏差を導出した. スパ浮体についても同様の処理を実施し, Table 13 にまとめた.

Fig. 16 Relationship between impulse and change in momentum with wave condition.

Table 13 Effect of waves on the impulse standard deviation [Ns]
(The value in parentheses are subtracted the results of calm water test).

FOWT	Calm water	Regular	Irregular
Semi-sub	0.11 (0.00)	0.36 (0.25)	0.27 (0.16)
Spar	0.22 (0.00)	0.41 (0.19)	0.30 (0.08)

今回の試験は、衝突箇所を完全に制御していないため、衝突箇所の不均一に伴う標準偏差のばらつきが発生する。これは、波浪中、平水中関係なく生じる現象である。また、波浪中の試験では、波浪による船舶及び FOWT の運動が衝突時の相対速度の変化として衝突事象に影響する。この 2 つは独立した事象であると推察されるため、平水中の結果については衝突箇所の影響のみが含まれ、波浪中の結果についてはそれに加えて波浪の影響が加算的に発生するものと考えることができる。この仮定の上で、波浪の影響のみを示すのが Table 13 のカッコ内に示す値である。これは、波浪中の標準偏差の値から、平水中の結果の差を取ったものである。これを用いて、衝突箇所の差異の影響と波浪の影響をそれぞれ整理する。まず、セミサブ型、規則波のときの標準偏差は 0.36 だが、そのうち 0.11 が衝突箇所の不均一性に寄与するものとした場合、波浪の影響は 0.25 ということになり、衝突時不均一性の倍程度、波浪の影響の方が大きいことが示された。対して同様の比較をスパーク型に対して実施した場合、0.41 のうち 0.22 が衝突時の不均一性に依存する標準偏差であり、波浪の影響とほぼ同等となることが明らかになった。波浪の影響自体はセミサブ型とスパーク型で大きな差はなく、浮体形式の影響が波浪時にも現れたといえる。浮体形式による衝突時の不確実性影響は、Fig. 14 で確認したようにスパーク型の方が大きい。規則波と不規則波の影響を比較すると、スパーク、セミサブともに規則波の標準偏差が大きくなることを確認した。他方、両者とも設定した波周期が 1 点であり、定性的な傾向とは断定できない。

3.8.2 エネルギー収支

衝突後(#03)のエネルギーを式(8)から式(10)に示した式で整理した結果を Table 14 から Table 16 に示す。

Table 14 から Table 16 を確認すると、全体的に E_{other} の割合が非常に高いことがわかる。 E_{other} に含まれる要素は、式(3)に示したように FOWT 模型緩衝材の変形に寄与したエネルギー E_{FD} と、熱や音などのエネルギー E_{delta} である。これに加えて、計測機器性能及び特定の運動モードに着目した解析方法により発生した運動エネルギーの取り逃しも含まれるが、Fig. 14 等の結果から、運動については十分妥当な評価ができていと考えられる。

Table 14 Energy balance effected by FOWT floater type and waves [%].

Test case	Ship surge	FOWT surge	FOWT pitch	FOWT mooring	Other
SS_A	1.9	24.0	0.1	2.3	71.6
SS_B	4.7	16.8	0.7	1.7	76.1
SS_C	2.0	22.8	0.3	1.8	73.2
SP_A	20.6	4.2	31.4	0.4	43.4
SP_B	23.0	3.5	32.3	0.2	41.0
SP_C	20.7	4.6	31.4	0.2	43.0

Table 15 Energy balance effected by displacement of the ship model (SS_D) [%].

Disp. [kg]	Ship surge	FOWT surge	FOWT pitch	FOWT mooring	Other
8.0	0.5	22.6	0.1	1.8	75.1
10.0	1.9	24.0	0.1	2.3	71.6
12.0	6.7	22.0	0.3	1.9	69.1

Table 16 Comparison of energy balance with FOWT mooring condition (SS_E) [%].

Condition	Ship surge	FOWT surge	FOWT pitch	FOWT mooring	Other
M1	1.9	24.0	0.1	2.3	71.6
M2	1.2	16.2	0.1	3.4	78.7
M3	1.9	16.5	0.2	7.9	73.9

改めて Table 14 から結果について検討する。この表は、浮体形式と波浪の影響を確認したものである。浮体形式が衝突後の挙動に大きく影響したのはここまで確認したとおりであるが、この表より定量的なエネルギーの割合として示され、セミサブ型 FOWT と衝突した場合は系全体に 2, 3 割程度のエネルギーしか残らない一方で、スパーク型 FOWT と衝突した場合は 6 割近くのエネルギーが残ることが確認できた。残留した力学的エネルギーの配分も明確になり、セミサブ型との衝突では FOWT のサージ運動エネルギーのみが残るのに対して、スパーク型との衝突では、FOWT のピッチ運動エネルギーが約 3 割、船舶のサージ運動エネルギーが約 2 割残ることが明らかになった。ともに係留の影響は少なく、最大で 3%未満である。波浪の影響は、今回のような通常想定され

る範囲では全体のエネルギー収支としては大きく影響しないことが確認でき、これは浮体形式に依存しないことがわかる。また、規則波と不規則波の違いも大きくは現れない。

Table 15 は船舶模型の排水量を変化させたときの影響を示す。排水量の増加に伴い、衝突後の船舶サージ運動エネルギーが増加した。また、 E_{other} が減少したことから、変形に寄与するエネルギーがわずかに低減することが判明した。

Table 16 は係留配置を変更したときの影響を示すものである。Table 14 で確認したように、初期配置の状態では係留の影響が小さいが、M3 になるとエネルギーの割合が 8 % 程度まで増加したことが確認できた。係留設定が M1 から M3 になった場合、その復原力はおおよそ 3 倍になるため、式(9)の定義どおり、係留の影響はそのままエネルギーに比例関係で反映された。

4. 考 察

今回実施した衝突試験では、浮体形式、波浪、船舶排水量、係留の 4 項目について衝突挙動への影響調査を実施した。

波浪の影響は、衝突前後のエネルギー収支には明示的に影響が表れない一方で、計測した力積が平水時の関係と比較して広範囲に分布し、確率論的な観点から見た衝突事象に大きく影響があることが判明した。また、規則波と不規則波では力積の分布に差異が見られたが、定性的な傾向を得たとはいえない。

浮体形式の変更は、衝突前後のエネルギー収支に直接影響を及ぼした。特にスパー型 FOWT は大きなピッチ運動が系全体の挙動に影響を及ぼし、衝突後も力学的エネルギーが 6 割程度残留したのに対し、セミサブ型 FOWT は衝突時に 3 割程度の力学的エネルギーしか残留しない。式(5)より排水量が同等の場合に残留する力学的エネルギーは約 5 割であり、これを基準とするとスパー型はこれよりも多くのエネルギーが残留し、セミサブ型では少ないエネルギーしか残留しなかった。これは、浮体特性と緩衝材の双方が影響した結果と推察できる。スパー型 FOWT との衝突時は先に示した通り大きなピッチ運動が発生し、船舶同士の衝突を前提とした式(5)の傾向とは異なる結果が得られたと推察できる。また、ピッチ運動の発生はナセル加速度の増加など、副次的な影響の発生要因となる点に注意が必要であると思われる。他方で、セミサブ型 FOWT との衝突時はピッチ運動が発生しにくい状況であったため、運動の傾向は船舶同士の衝突現象と近くなったと思われるが、緩衝材の変形量がより大きくなり、評価できないエネルギーが増えたものと思われる。

船舶排水量の影響も浮体形式同様にエネルギー収支に直接影響があった。これも浮体形式と同じく、式(5)によって整理が可能であり、衝突体が被衝突体に対して重くなるほど変形に寄与するエネルギーの割合が小さくなるという傾向と一致した。

今回採用したカテナリー係留のように、初期位置近傍でサージ復原力の小さい係留は、衝突の瞬間に過剰に大きな張力は現れず、衝突後に受け持つエネルギーも 3 % と非常に低いことが明らかになった。試験実施前の検討では衝突の瞬間のピーク張力が大きく作用する状況も想定していたが、緩係留の場合は影響が小さいことが明確になった。影響が大きく現れるのは、衝突後のサージ大変位に伴う張力増加であり、この時の最大張力には注意する必要がある。また、サージ方向の復原力に比例して、寄与するエネルギーが増加する傾向が確認できたため、定格発電時のように定常的な大荷重が作用して平衡状態が大きく変化している場合や、テンションレグ係留などでは係留破断の危険性を含めて考慮する必要性があると推察できる。

5. 結 言

船舶と FOWT の衝突現象について、剛体の船舶模型と、局所的に弾性部材を採用した FOWT 模型を用い、模型試験を実施した。衝突前後の船舶模型運動量と衝突時の船首部荷重から求めた力積を比較して試験の妥当性を確認するとともに、系全体の力学的エネルギー収支と衝突パラメータの関係を調査した。パラメータとして、主要素と考えられる浮体形式、船舶排水量、波浪、係留の 4 つを取り上げた。結果、以下を明らかにした。

- 浮体形式の影響は大きく、船舶がスパー型 FOWT と衝突した際は浮体のピッチ運動発生に伴い系全体で力学的エネルギーが 6 割程度残留したのに対し、セミサブ型 FOWT との衝突時は 3 割程度しか残留しない。
- 衝突船舶の排水量も、エネルギー収支への影響が大きく、排水量が増加するほど系全体に多くの力学的エネルギーが残留した。この傾向は運動量理論と一致する。
- 波浪の影響は衝突前後のエネルギー収支には影響が少ないが、衝突荷重の力積の標準偏差に作用した。浮体形状によるが、平水時の 2 から 3 倍程度に力積の標準偏差が増加した。また、規則波と不規則波では規則波の方が大きな標準偏差を示したが、波条件の点数が少なかったこともあり、定性的な傾向とは断定できない。
- カテナリー係留かつ定常的な大荷重が作用しない状態では、船舶衝突時に係留に寄与するエネルギーは、初期エネルギーの 3 % 未満であり、ほぼ無視できる。
- 船舶と FOWT 間の衝突現象について、浮体形式や船舶排水量の変化は系全体の動特性に大きく影響することが判明した。他方、カテナリー係留の配置変化や、波浪影響は、状況によっては動特性に大きく影響しないことが判明した。
- 衝突事象に関する FOWT 特有の影響としては、スパー型 FOWT のように小復原力の浮体では衝突に伴ってピ

ッチ運動が発生する可能性が高く、運動に伴う加速度を考慮しておく必要があること、また、発電状態のように、定常的な大荷重が作用する場合は、上流側係留が緊張状態となり、衝突時に大きな荷重が発生する可能性があることが挙げられる。

謝 辞

本研究は、国土交通省海事局の受託研究「浮体式洋上風力発電施設の安全評価手法等の調査研究（2018 年度）」により実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Ishihara, T.: Fukushima Recovery, Demonstrative Research Project of Offshore Floating Wind Turbine Farm (1) -The World's First Floating Offshore Wind Farm Challenge, Journal of the JIME Vol. 50, No.1, pp.14-19, 2015 (in Japanese).
石原孟：福島復興・浮体式洋上ウィンドファームの実証研究事業(1)- 世界初の浮体式洋上ウィンドファームへの挑戦, 日本マリンエンジニアリング学会誌第 50 巻第 1 号, pp.14-19, 2015.
- 2) Utsunomiya, T., Sato, I., Shiraishi, T.: Floating Offshore Wind Power Generation in Kabashima, Goto City, Systems, Control and Information, Vol. 60, No. 9, pp.402-406, 2016 (in Japanese).
宇都宮智昭, 佐藤郁, 白石崇：五島市杵島における浮体式洋上風力発電について, システム/制御/情報, Vol. 60, No. 9, pp. 402-406, 2016.
- 3) Chujo, T., Haneda, K., Komoriyama, Y., Yamada, Y., Fujiwara, T., Inoue S.: Study for damage Stability on Floating Offshore Wind Turbine with Striking by Ship, Proceedings of JCROSSAR2019, pp.12-15, 2019 (in Japanese).
中條俊樹, 羽田絢, 小森山祐輔, 山田安平, 藤原敏文, 越智宏, 井上俊司：浮体式洋上風力発電施設と船舶の衝突に係る損傷時復原性の検討, 構造的な安全性・信頼性に関する国内シンポジウム JCROSSAR2019 論文集, pp.12-15, 2019.
- 4) Minorsky, V.U.: An Analysis of Ship Collisions of Nuclear Power Plants, Journal of Ship Research, Vol.3 No.2 pp.1-4, 1959.
- 5) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO): Floating Offshore Wind Power Generation Technology Guidebook, 2018 (in Japanese).
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：浮体式洋上風力発電技術ガイドブック, 2018.
- 6) IEC61400-3-1: Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines, 2019.
- 7) WAMIT Inc: WAMIT USER MANUAL, 2018.
- 8) Karasuno, K., Nonaka, K., Maekawa, K., Akimoto K.: A Quick Chart for Added Masses of Floating Structures with Block Types, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, pp.79-85, 1998 (in Japanese).
烏野慶一, 野中晃二, 前川和義, 秋川研一：箱型浮体構造物の付加質量チャート, 関西造船協会誌第 229 号, pp.79-85, 1998.