

洋上風力発電用バージ型浮体の実証研究における 浮体・係留に関する設計検証



竹内海智 ①
新里英幸 ②
田村大樹 ①
大窪慈生 ③
三谷俊輔 ④
原健 ④

要旨

NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）から委託された「次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究」の一環として、日立造船は北九州沖に設置された洋上風力発電用バージ型浮体（以下、浮体）の実証研究を2019年から行っている。本報では、浮体・係留性能に関する、連成解析モデルより求めた計算値と観測値の比較検証結果について報告する。

一般的に、浮体構造物には、波、風および潮流などの自然外力と係留索からの反力がともに外力として作用する。この状態における浮体構造物の運動を求めつつ、それによって生じる係留力の変動を求めることが係留設計の中心的課題である。このため、観測データのうち係留力が設計結果と概ね一致し許容範囲内であることを確認し、設計に用いた設計条件と解析・照査方法の妥当性を検証した。

また、浮体設計について、高波浪時の2020年12月30日に着目し、観測した波、風や潮流のデータを用いて浮体・係留部材の連成解析を行い、浮体運動や係留力に関する計算値と観測値を比較検証した。その結果、浮体に作用する係留力を概ね再現できていることを確認した。本解析では、浮体運動方程式を解く際の粘性減衰項に対して水槽実験結果を基にしたモデル化を行い、その有効性が高いことも確認できた。

キーワード

浮体式洋上風力発電, バージ型, 実証研究, 設計検証

1. 緒言

日本は四方を海に囲まれており、エネルギーや鉱物資源に乏しい島国である。一方で、日本は世界有数の領海や排他的経済水域を誇る海洋国家である。近年では、近海に存在する海洋エネルギーや海洋鉱物資源の開発が進んでいる。その中でも、洋上風力発電は海洋再生エネルギーとして大きく期待されている。洋上風力発電には、風車の支柱を、海底地盤基礎に固定する「着床式」と浮体式構造物に固定する「浮体式」の2種類がある。一般的に、水深50m以深では「着床式」の採算性が悪化するため、「浮体式」が有効とされている。遠浅の海が広がる欧州と異なり、日本は海底が急深な海が多くを占めるため、日本国内では「浮体式」の洋上風力発電がこの先必要になると考えられている。

当社は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務として、浮体式としては小型かつ軽量のバージ型浮体（以後、浮体と呼ぶ）を採用した次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究に取り組んでいる。浮体および設置イメージを図1に示す。本実証研究は、北九州沖の海域にて2019年5月に開始したが、それ以前に、水面上での浮体運動性能を把握するため2度の水槽実験を実施した。1度目の水槽実験では、ムーンプールやスカートの評価を行った¹⁾。2度目の水槽実験では、50年間で発生すると想定される最も厳しい波浪条件に対する浮体の安全性を確認した²⁾。

本報では、実証研究中に取得した膨大な観測データの中で係留力に着目し、その傾向を整理・把握する。これより、観測した係留力が設計時に想定した係留力の範囲内であるかの設計検証を行う。また、取得した観測データのうち、浮体運動に影響を与える環境条件の風、波、潮流に関するデータを入力として浮体・係留部材の連成解析（以後、数値計算と呼ぶ）を実施する。ここで、係留力の観測値と計算値を比較することにより、数値計算モデルの妥当性の検証を行う。

① 機械・インフラ事業本部 開発センター

② 機械・インフラ事業本部 開発センター 博士(工学)、技術士(船舶・海洋部門)

③ 機械・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 機械・インフラ事業本部 風力発電事業統括部 技術・開発部

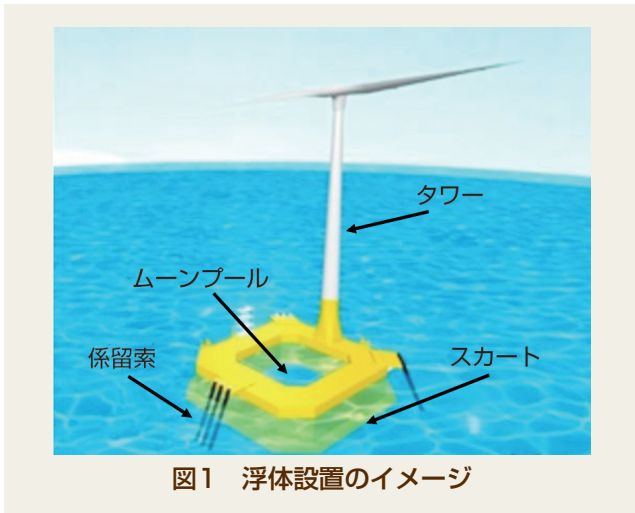


図1 浮体設置のイメージ

2. 実証研究

2.1 主要諸元・項目

2.1.1 座標系 浮体の概略図を図2に示す。

浮体は北向きに設置され、風車は浮体南側に取り付けられている。この方位と浮体の関係は実証研究時の設置状況に即している。

座標系は、浮体上面の中央を原点OとするO-XYZ座標系を使用している。座標軸の方向は、原点Oから北方向をX軸の正、西方向をY軸の正、原点Oを通る鉛直上方向をZ軸の正とする。

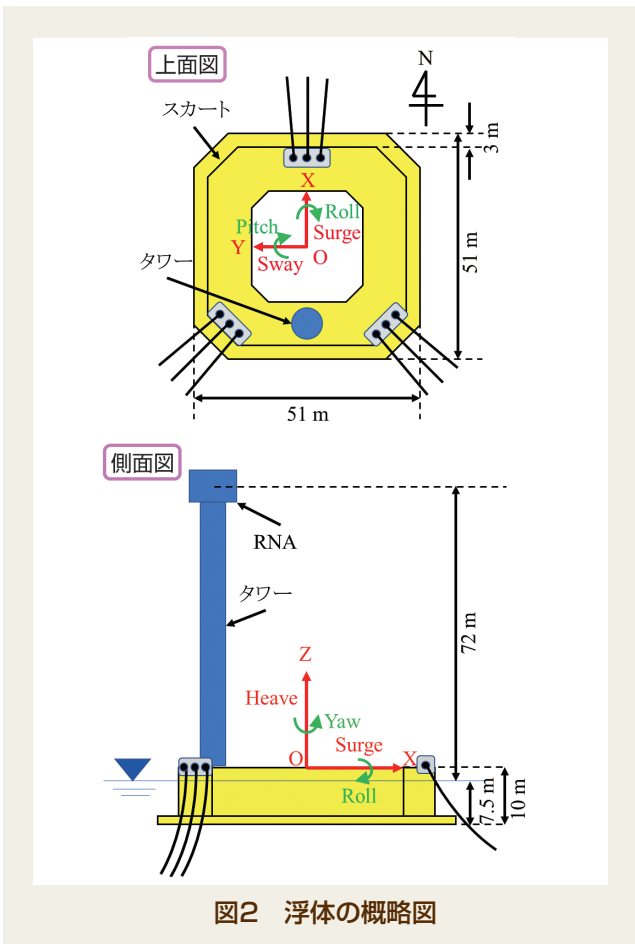


図2 浮体の概略図

次に、浮体の6自由度の運動モードを定義する。X軸、Y軸、Z軸の座標軸方向の並進運動はそれぞれSurge (前後揺れ)、Sway (左右揺れ)、Heave (上下揺れ)である。また、並進運動の正負は座標軸の正負と同様である。また、各座標軸まわりの回転運動はRoll (横揺れ)、Pitch (縦揺れ)、Yaw (船首揺れ)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。

2.1.2 浮体の主要諸元

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斜するときの浮心位置軌跡の曲率中心である。また、X、Y、Z軸周りの慣動半径をそれぞれ K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} とし、表1にその値を示す。表中RNAはRotor Nacelle Assembly (ブレード、ハブ、シャフト、ナセル等の総称) である。

表1 浮体の主要諸元

項目	単位	内容・数値
1)浮体材質	-	鋼製
2)浮体重量(タワー、RNA、係留、バラスト含む)	t	9858
3)長さ・幅(スカート張出し長の各3mを含む)	m	51.0
4)型深さ	m	10.0
5)喫水(係留索設置後)	m	7.5
6)重心高さ KG	m	7.275
7)メタセンター高さ GM	m	24.1
8)慣動半径 K_{xx}	m	18.7
9)慣動半径 K_{yy}	m	20.3
10)慣動半径 K_{zz}	m	21.1

2.1.3 係留系の主要諸元

洋上に浮体を設置するにあたり、風、波や潮流等の外力による浮体の漂流を防ぐため、係留索により浮体位置を保持する必要がある。ここで、本実証研究における係留の様子ならびに外力の作用する方向の定義を図3に、係留の主要諸元を表2に示す。浮体は北側、南西側および南東側の3カ所にそれぞれ3点ずつ係留点を持つ。北側の係留索の内、東側の係留索をML1として、そこから反時計回りに残りの係留索をML2~ML9と呼称する。また、風・波の方向 θ_1 は北から南に向かう方向を0degとし、時計回りを正とする。一方で、潮流の向き θ_2 は南から北に向かう方向を0degとし、時計回りを正とする。

2.2 計測方法

2.2.1 計測項目

浮体に様々な計測機器を設置することで、実証研究海域における環境条件、浮体運動や係留力等を計測する。浮体等に取り付けた計測機器から得られる観測項目は300種類を超える。そ

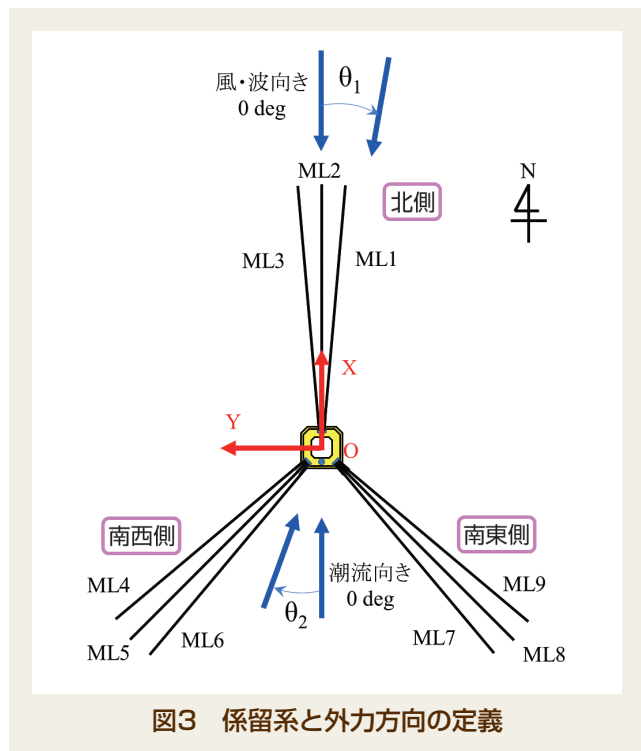


図3 係留系と外力方向の定義

表2 係留系の主要諸元

項目	単位	内容・数値
1) 係留索数	-	3方向へ各3本
2) チェーン全長	m	551 (ML1~3)、522 (ML4~9)
3) チェーンリンク径	mm	132
4) スタッド	-	なし
5) 単位重量	kg/m	349
6) 破断荷重	kN	15,965

のためここでは、本報に関連する計測項目のみを抜粋して、その計測機器や設置場所等を表3に示す。本実証研究では、係留歪計で計測される歪値に校正係数である26kN/ $\mu\epsilon$ を掛け算することで係留力に変換している。この校正係数は構造解析を実施し、歪と係留力の関係式を算出し、その関係式の傾きから求めた。また、表3に対応して図示したものが図4である。図4にて、青字は環境条件、赤字は浮体の運動変位、緑字は浮体側係留力に関する計測機器をそれぞれ示している。

表3 計測項目

計測項目	計測機器	設置場所
1) 風速、風向き	風向風速計	A
2) 波高、波周期、波向き、潮流速、潮流の向き	海象計 (海底設置型)	B
3) 浮体の並進運動 (Surge・Sway・Heave)	RTK-GPS	C
4) 浮体の回転運動 (Roll・Pitch)	FOG (Fiber-Optic Gyroscope)	D
5) 浮体の回転運動 (Yaw)	方位コンパス	E
6) 浮体側係留力	係留歪計	F

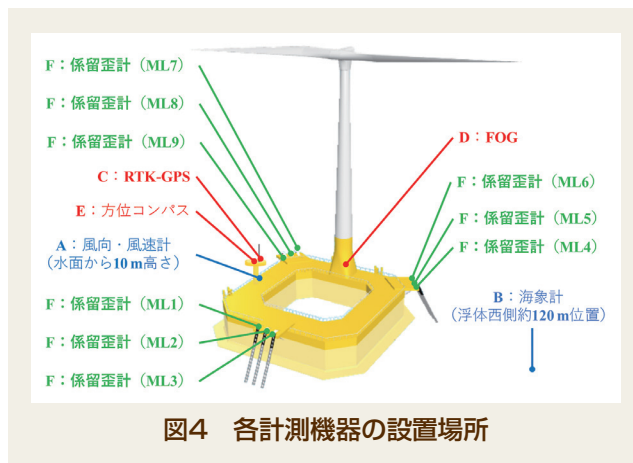


図4 各計測機器の設置場所

2.2.2 座標変換 表3で示した計測機器にて取得される観測データの内、浮体運動に着目する。浮体の運動は並進運動と回転運動に分けることができる。回転運動は浮体のどの場所で計測しても同じ値となるが、並進運動は回転運動の影響を受けるため、計測場所によって異なる値を示す。以後、浮体の運動を重心周りの運動変位として評価するため、RTK-GPSで取得される並進運動を座標変換して、重心周りの運動変位にする必要がある。よって、以下の式(1)~(3)を用いて並進運動の座標変換を行い、重心周りの運動変位を求めた。

$$\text{Surge} = \eta_{1(\text{RTK})} - z_g \cdot \eta_5 + y_g \cdot \eta_6 \quad (1)$$

$$\text{Sway} = \eta_{2(\text{RTK})} + z_g \cdot \eta_4 - x_g \cdot \eta_6 \quad (2)$$

$$\text{Heave} = \eta_{3(\text{RTK})} - y_g \cdot \eta_4 + x_g \cdot \eta_5 \quad (3)$$

ここで、Surge、Sway、Heaveはそれぞれ重心周りの運動変位を、 $\eta_{1(\text{RTK})}$ 、 $\eta_{2(\text{RTK})}$ 、 $\eta_{3(\text{RTK})}$ はそれぞれRTK-GPSで計測されるSurge、Sway、Heaveの並進運動を、 η_4 、 η_5 、 η_6 はそれぞれ浮体のRoll、Pitch、Yawの回転運動を、 x_g 、 y_g 、 z_g はそれぞれ重心からRTK-GPSの設置位置までのX、Y、Z方向距離を示す。

一方で、水平面内の運動には、長周期運動の一種である振れ回り運動が存在する。これは、係留された浮体が作用する外力により、ゆっくりと大振幅の運動を生じる現象である。

2.3 比較検証期間の選定 これまでに、2019年9月の台風襲来時等に対して、実証研究結果と数値計算結果の比較を行ってきた³⁾。しかし、2020年5月のRTK-GPSのモード変更により、並進運動のデータ取得精度が向上した。そのため、比較検証に用いる期間を新たに選定した。ここで、期間の選定基準として以下の①~③を設けた。①RTK-GPSの計測精度向上後であること。②有義波高が4 m以上の荒天時であること。③荒天時に伴い、風車は停止している状態であること。本報では、これらの条件に当てはまる期間の中から計測された有義波高が最も大きい代表的な1ケースである、「2020年12月30日14時25分~14時45分の20分間」について着目し、その比較検証結果について論じる。この期間に観測した環境条件の統計値を表4に示す。

表4 選定された比較検証期間と観測した環境条件

項目	単位	パラメータ
比較検証期間	-	2020/12/30 14:25~14:45
有義波高	m	4.4
有義波周期	s	8.3
平均波向き	deg	306
平均風速@Z=10 m	m/s	15.9
平均風向き	deg	296.2
平均潮流速	m/s	0.3
平均潮流向き	deg	55.7

2.4 実証研究結果

2.4.1 スペクトル解析を用いたデータ処理

取得した観測データには、浮体の運動成分とは異なる多くのノイズ成分が含まれている。特に、係留力を計測している係留歪計には日射影響、潮汐影響や計測値のドリフト等が含まれるため、データ処理は必要不可欠である。そこで、上記の比較検証期間における観測データに関する検討を行う前に、浮体運動および係留力についてデータ処理を実施する必要がある。ここで、浮体の運動と係留力について実現象以外の成分を明らかにするため、スペクトル解析を実施した。行ったスペクトル解析の結果を図5、図6にそれぞれ示す。なお、図中縦軸はそれぞれの運動ならびに係留力のパワースペクトル密度(PSD: Power Spectral Density)である。また、ML8については比較検証期間において係留歪計が故障中のため、データ欠測となっている。

図5より、Surge、Sway、Yawの水平面の運動には「0.09~0.12Hz」、「0.01Hz前後」および「0.001Hz以下」の3カ所にスペクトルのピークが確認できる。一方で、これら以外のHeave、Roll、Pitchの運動には「0.09~0.12Hz」と「0.001Hz以下」の2カ所にしかスペクトルのピークが現れない。これは、「0.01Hz前後」の成分が、係留により生じる浮体の振れ回り運動に相当しているためと推測される。また、「0.09~0.12Hz」は周期にすると「8.3~11.1s」となり、比較検証期間の波浪状況(有義波周期8.3s)とも合致するため、波浪影響による成分であると言える。

図6に示す係留力のスペクトルにも、Surge、SwayおよびYawのそれと同様の周波数帯3カ所にて、ピークが確認できる。一方で、「0.001Hz以下」の成分は上述の日射影響、潮汐影響や計測値のドリフト等に相当していると考えられる。よって、データ処理として、浮体の運動成分とは異なる「0.001Hz以下」の成分をハイパスフィルターにより除去した。ここで、ハイパスフィルターの使用により、浮体の運動および係留力の時系列の変動基準が0となる。しかし、これでは浮体の定常変位量や初期係留力(環境条件や浮体の運動が無い静穏時の係留力)の評価が行えない。よって、浮体の運動および係留力に関しては、ハイパスフィルターを用いる前の運動ならびに係留力の平均値を、ハイパスフィルター処理後のそれぞれの時系列に加算した。

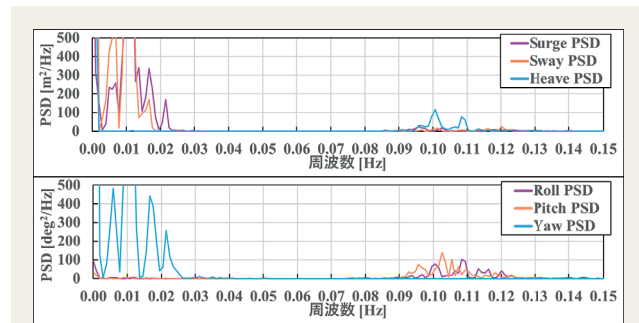


図5 浮体運動のパワースペクトル密度

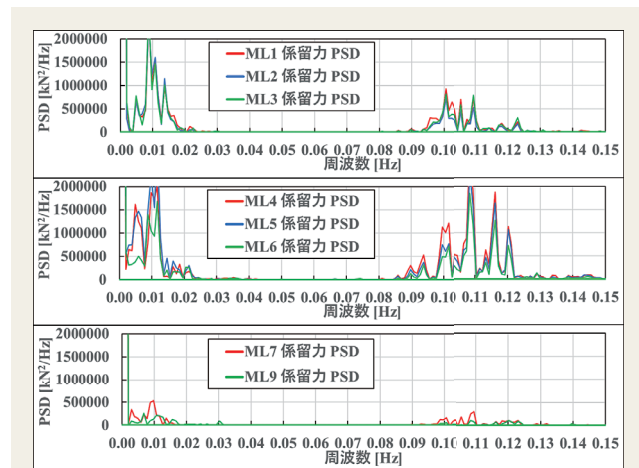


図6 係留力のパワースペクトル密度

2.4.2 浮体運動と係留力 前節のデータ処理を施した、比較検証期間である20分間(1200s)における浮体の運動と係留力をそれぞれ図7、図8に示す。

図7より、Surge方向移動量は-1.6mを平均値として-7.9~+4.3mの範囲の変動を示している。また、Sway方向移動量は-3.5mを平均値として-10.9~0.7mの範囲で変動している。つまり、原点Oから見たときに、浮体は東南東に定常変位した位置で、運動していると言える。表4に示す環境条件の内、平均波向きは306deg、つまり西北西から作用していることからこの定常変位は妥当であると判断される。さらに両移動量には約100s周期の振幅も確認できる。これは、前節で推測した浮体の振れ回り運動に相当する。Heaveについては、ほぼ0を基準に上下運動を行っているのがわかる。Roll、Pitchの回転運動は、0.0degを基準としてそれぞれ-3.5~+3.5degの範囲で推移している。Yawに関しては、-8.1~+4.9degの範囲で変動が確認された。

図8より、北側のML1~3ならびに南西側のML4~6それぞれの方向群毎に計測される係留力の傾向はほぼ同様であることが確認できる。一方で、他の方向群と比較して南東方向のML7、9において係留力の一致度が低い。上述したように、浮体が南南東に定常変位したことにより、南東側に位置するML7~9の係留索は緩む。よって、ML7、9にて係留力の一致度が低いのは、観測される係留歪の変化量が他係留索よりも微小であったことによる精度の低下が原因であると推察される。

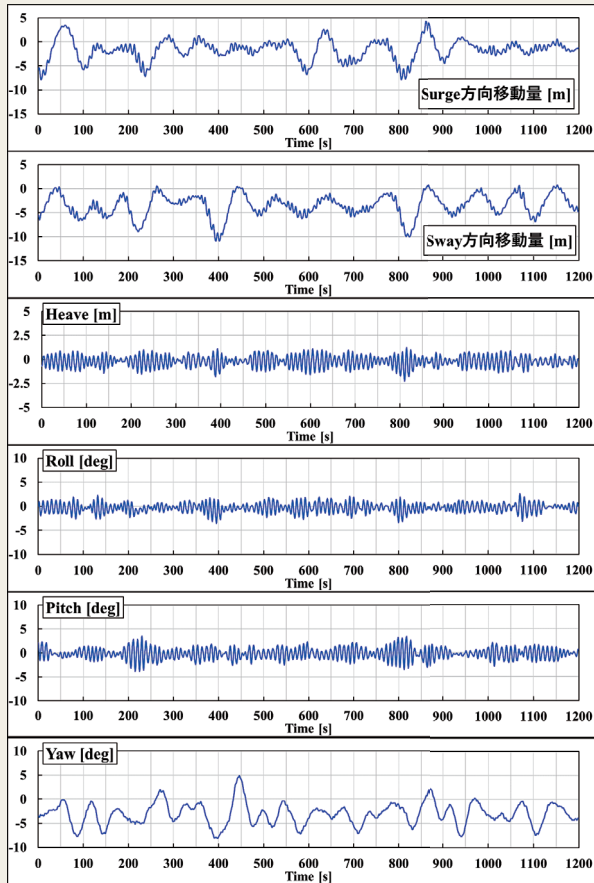


図7 比較検証期間における浮体運動の時系列

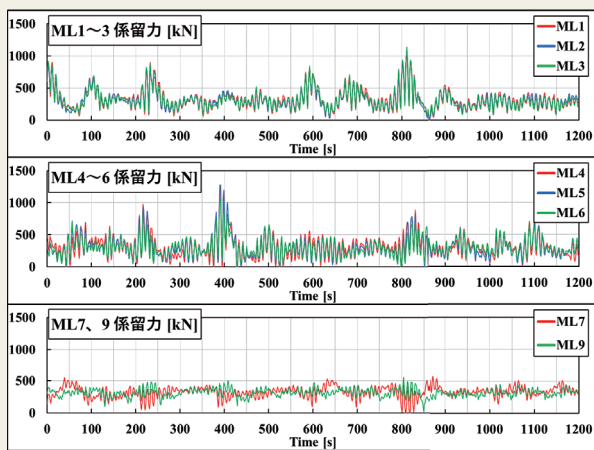


図8 比較検証期間における係留力の時系列

次に、水平面の浮体の運動と係留力の相関に着目する。まずSurge方向移動量は、図中時間200~250sと800~850sにおいて-7.9m程度であり、これは浮体が最も南側に位置していることを示している。この時間帯のML1~3の係留力も800kNを超える係留力が確認できる。また、Sway方向移動量については、図中時間400s前後にて-10.9m程度であり、最も東側に位置していることがわかる。同じ時間帯のML4~6でも1000kNを超える係留力を示している。よって、浮体のSurge方向移動量とML1~3の係留力、Sway方向移動量とML4~6の係留力それぞれに相関があることを確認した。

また、係留索の破断荷重が約16000kN（腐食摩耗代は考慮していない）であるのに対して、今回の荒天時における係留力の最大値が1500kN以下であり、破断荷重を大きく下回ることを確認した。なお、係留設計は50年間で発生すると予測される最も厳しい環境条件を用いて行われている。今回の比較検証期間では上記のような厳しい環境条件が発生しなかったため、係留力の観測値が破断荷重を大きく下回る結果となった。

3. 数値計算

3.1 計算方法 実証研究にて得られた環境条件に関する観測データを数値計算ソフトOrcaflexの入力値として用いることで、浮体の運動応答および係留力を求める。なお、この数値計算では、係留索は環境条件に応じて動的に応答するものと想定している。手法としては、係留索に作用する流体抵抗を考慮することができるランプドマス法を用いている。ランプドマス法とは、係留索を微小長さに要素分割し、各要素の質点の流体力を含む運動方程式を解く手法である。

以上より、浮体の運動ならびに係留力は以下の式(4)と(5)の連立方程式を解くことで求められる。

$$(M + A)\ddot{\eta}(t) + B\dot{\eta}(t) + C\eta(t) + N|\dot{\eta}(t)|\dot{\eta}(t) = D(\eta(t)) + F_1(t) \quad (4)$$

$$M_k \ddot{\xi}_k(t) + B_k \dot{\xi}_k(t) + C_k \xi_k(t) + N_k |\dot{\xi}_k(t)| \dot{\xi}_k(t) = F_2(t) \quad (5)$$

ここで、Mは浮体質量、Aは付加質量係数、Bは造波減衰係数、Cは静的流体圧力により発生する復原力係数、Nは浮体の粘性減衰係数、Dは係留索に作用する係留力、 F_1 は風力 F_{wind} 、波強制力 F_{wave} （波漂流力成分を含む）および潮流力 $F_{current}$ を含む外力、 η は浮体重心の運動変位、 t は時間をそれぞれ示す。本報では、浮体の粘性減衰係数Nについては水槽実験でキャリブレーションした値でモデル化している。また、 M_k は質点kの質量、 B_k は質点kの造波減衰係数、 C_k は質点kの復元力係数、 N_k は質点kの粘性減衰係数、kは質点の番号、 ξ_k は質点kの運動変位である。また、外力 F_2 は波力と潮流力を含む。なお、付加質量係数Aと造波減衰係数B、波強制力 F_{wave} については、ポテンシャル理論に基づく三次元特異点分布法を用いて求めた。

3.2 計算条件 数値計算に用いる環境条件の入力について、以下の通り説明する。

風速については観測データの時系列を入力する。また、風向きに関しては、表4に示される平均風向きを296.2deg一定とした。

波高に関してはJONSWAPスペクトルを使用して、乱数を与えることで、不規則かつ有義波高が4.4m、有義波周期が8.3sとなるような波の時系列を再現した。波向きについては、表4に示すように平均波向きは306degであるが、観測データの波向きスペクトルを確認すると、257degと

355degの2方向にピーク波向きが現れていた。よって、数値計算上の波向きはこれら2方向にそれぞれ方向分散性を持たせたものとして設定した。方向分散性は式(6)に示す方向分布関数 $S(\theta)$ により評価した。

$$S(\theta) = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right)}{\sqrt{\pi}\Gamma\left(\frac{n}{2} + \frac{1}{2}\right)} \cos^n(\theta - \theta_p) \quad (6)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta - \theta_p \leq \frac{\pi}{2}$$

ここで、 n は方向分散係数、 Γ はガンマ関数、 θ は波向き、 θ_p はピーク波向きを示す。なお、本数値計算では波長と水深の関係より、方向分散係数 n は4としている。潮流に関しては表4の平均潮流速0.3m/sおよび平均潮流向き55.7degをそれぞれ一定潮流速かつ一定潮流向きとして入力する。係留に関しては表2の係留索の主要諸元を基にして設定した。

3.3 計算結果 算出した浮体の運動ならびに係留力の計算結果をそれぞれ図9～図11に示す。

図9より、風速が15.9m/s程度を平均値として変動している。また、波高も0.0を基準として-5.0～+5.0mの範囲で推移しており、入力した有義波高4.4mを再現できている。潮流速は0.3m/sの一定流速となっている。以上より、設定した環境条件を満足していると言える。

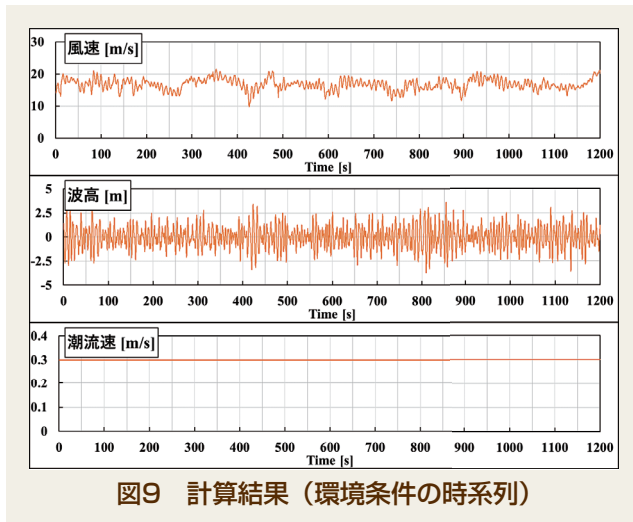


図9 計算結果 (環境条件の時系列)

図10より、Surge方向移動量は-0.9mを平均値として-4.0～+0.4mの変動量を示す。Sway方向移動量については-3.3mを平均値に取り、-9.2～-0.6mの範囲で変動している。つまり、浮体は原点Oから東南東に定常変位した状態で、振れ回り運動している。浮体に作用している平均波向きが306degであるので、浮体の定常変位方向は妥当であると言える。Heaveは0.0mを基準として-2.3～+2.3mの範囲で運動しており、波高の時系列と類似した傾向が確認できる。例えば、図中の時間400～450sで、波高とHeaveにピークが発生している。Rollは-3.9～+3.1deg、Pitchは-2.2～+2.9degの範囲で推移しており、回転運動の振幅量としてはPitchよりもRollの方が大きい。これは、

浮体に作用する波向きによる影響である。また、それぞれの回転運動は0を基準としているため、浮体に定常傾斜が生じていないことが確認できる。Yawに関しては、-1.5degを平均値として-6.6～+0.9degの範囲で変動している。

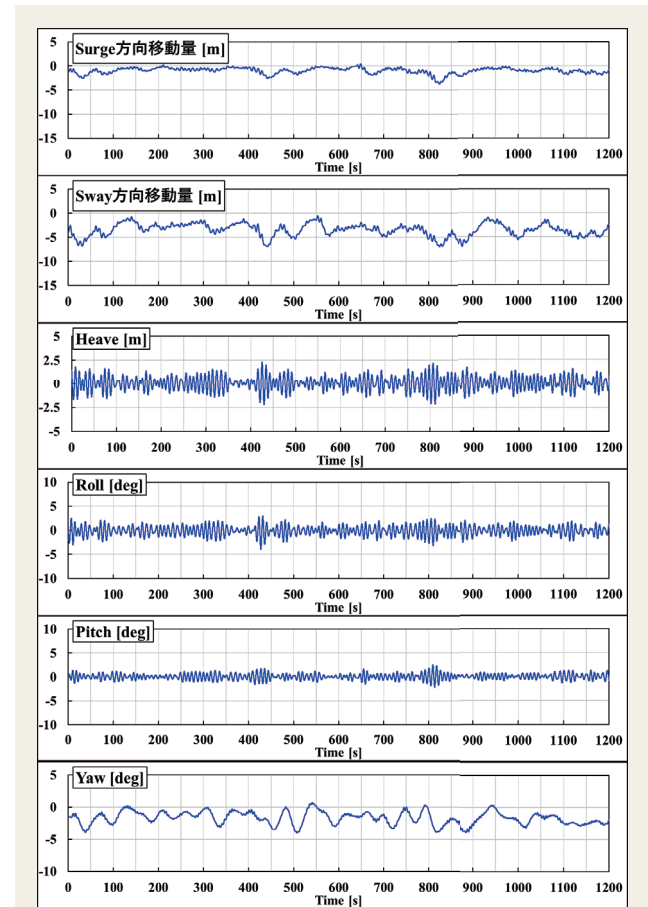


図10 計算結果 (浮体運動の時系列)

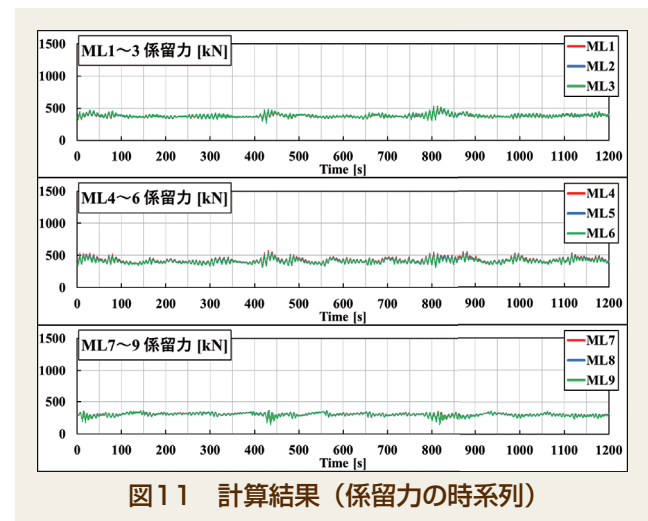


図11 計算結果 (係留力の時系列)

図11より、ML1～3、ML4～6およびML7～9それぞれの方向群毎に計測される係留力の傾向は類似していることが確認できる。ML1～3の係留力は約380kNを平均値としているが、ML4～6の係留力は約410kNを平均値として変動しており、ML1～3よりもML4～6にて定常的に約30kN大きい係留力が作用していることがわかる。これは、Surge方向移動量よりもSway方向移動量が大きく、

南西側のML4～6が引っ張られた結果、定常的に係留力が大きくなったためである。また、ML7～9では係留索が緩むため、係留力の平均値は300kN程度と、他係留索と比較して小さくなる。

3.4 観測値との比較 観測値と計算値を比較する。まず、浮体の運動の時系列を比較する。ここで、比較対象として、最も係留力の変動と相関のあるSurge方向移動量とSway方向移動量に着目する。観測値と計算値それぞれの移動量の平均値とその範囲を表5に示す。表5より、浮体の移動量について、観測値より計算値の方が、平均値・移動範囲共に小さいことがわかる。浮体の移動量に関して平均値や移動範囲が異なると、移動量と相関のある係留力は当然影響を受ける。このため、係留力についても観測値と比較して計算値の方が小さく算出されたと考えられる。

数値計算の移動量が観測値のそれより小さく算出された原因としては、以下の2点が考えられる。

- 数値計算では環境条件の作用する方向を一定としたが、実海域では時々刻々と環境条件が作用する方向は変化する。数値計算では、この部分が再現できていない。
- 方向分散係数 n を4として数値計算していたが、この方向分散係数では、実現象として発生している方向分散を再現しきれない可能性がある。

表5 移動量の平均値および移動範囲の比較

項目		平均値	移動範囲
		[m]	[m]
Surge 方向 移動量	観測値	-1.4	-7.9～+4.3
	計算値	-0.9	-4.0～+0.4
Sway 方向 移動量	観測値	-3.5	-10.9～0.7
	計算値	-3.3	-9.2～-0.6

よって、浮体の移動範囲がそれぞれ異なる観測値と計算値について、時系列もしくは統計値を用いて比較検証することは難しいことが明らかとなった。そこで、浮体に作用する環境条件や原点Oから見た浮体の移動量が観測値と計算値で一致する条件における係留力を比較する。ここで、選定にあたり各係留索群にて係留力が最大となる3つのCaseを設けた。以上より、「浮体が最も南方向に移動しML1～3の係留索が引張られるCase1」、「浮体が最も東方向に移動し、ML4～6の係留索が引張られるCase2」、ならびに「浮体が最も西方向に移動し、ML7～9の係留索が引張られるCase3」について、それぞれに対応する観測値の時間を表6に示す。また、各Caseにおける係留力の比較を行った結果を図12に示す。

表6 選定の条件と観測値の対応時間

項目	Case1	Case2	Case3
条件	数値計算の南方向移動量最大	数値計算の東方向移動量最大	数値計算の西方向移動量最大
観測値の対応時間	2020/12/30 14:26:29	2020/12/30 14:31:50	2020/12/30 14:42:50

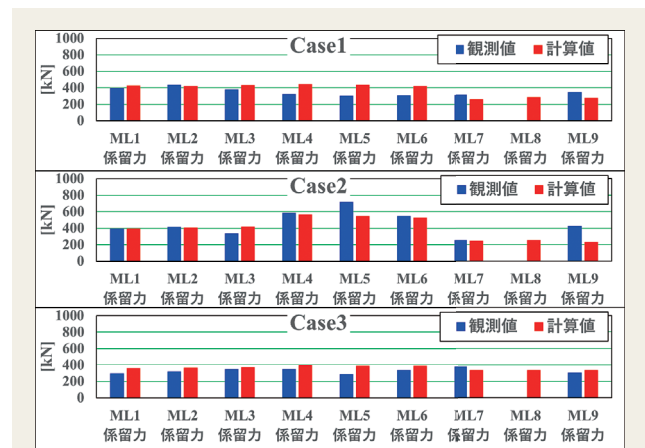


図12 観測値と計算値の比較 (係留力)

図12より、数値計算にて浮体が最も南方向に移動したCase1の比較では、ML1～3、7、9にて係留力の観測値と計算値の差が±100kNであった。それ以外の係留索では101kN以上の差が生じていた。Case2ではML1～4、6、7にて係留力の観測値と計算値の差が±100kNに収まっていた。Case3では、ML5を除く全ての係留索にて係留力の観測値と計算値の差が±100kNの範囲内であった。ここで、±100kNの差が大きいかどうか考察する。2.2.1項で述べたように、本実証研究において、係留歪計で計測される歪に校正係数 $26\text{kN}/\mu\epsilon$ をかけて係留力に変換している。つまり、100kNの係留力は歪に換算すると約 $4\mu\epsilon$ ということになる。以上より、係留力に生じる100kN程度の差は計測誤差と考えることもできる。さらに、係留索の破断荷重が約16000kNである点を考慮すると、100kNは破断荷重の0.625%ほどでしかない。よって本報では係留力について、実証研究結果と数値計算結果の差が±100kN以内であれば一致度は高いものとした。

また、今回の検討では浮体の運動に関しては移動量のみを一致させた比較を行っており、浮体の回転運動については考慮していない。そのため、浮体の回転運動量も一致させて比較できれば、係留力について観測値と計算値の一致度を一層高めることができると考えられる。

以上より、係留力について観測値と計算値の一致度が高いことから、本数値計算に用いた粘性減衰項に対するモデル化の有効性が高いことも明らかとなった。

4. 結 言

浮体に関し、実海域での実証研究結果のまとめとして、観測値と計算値の比較検証を行った。

比較検証の結果、環境条件、浮体の運動ならびに係留力の計測値それぞれに相関が確認できた。このことから、実証研究における各種観測データの取得は正常に行っていると推測される。係留力については、ML1～3(北側)、ML4～6(南西側)およびML7、9(南東側)の各方向の係留索群内において、波形と値に類似した変動傾向が確認でき、このことで各方向3本へ係留力が分散されていることを確認した。さらに今回の荒天時に生じて

いた係留力の最大値が係留索の破断荷重（腐食摩耗代は考慮していない）の1/10以下であり、破断荷重を大きく下回ることを確認した。よって、実証研究にて観測される係留力は設計時に想定した係留力の範囲内であったことから、係留力の計算・設計方法の妥当性が確認できた。

実証研究により得られた観測データを入力値とし、粘性減衰項を水槽実験でキャリブレーションした値を用いてモデル化を行い、数値計算から浮体の運動や係留力を算出した。その結果、観測値と計算値の浮体の移動量が合致する場合における係留力の比較では、高い一致度が確認できた。よって、本数値計算に用いた設計条件の妥当性と使用した数値計算モデルの有効性が高いことが明らかとなった。また、数値計算上の移動量については、方向分散性係数の変更など、今後、数値計算の入力方法を再検討することで実証研究の結果をより精度良く再現できるよう検証を重ねていく予定である。

SDGsに貢献する技術

本技術を用いることで、浮体式洋上風力発電を活用した再生可能エネルギーの安定的な供給に貢献することができる。

謝 辞

NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務として取り組んでいる本研究

開発に携わった関係者の皆様方には、この場を借りて心より御礼申し上げます。本研究成果が、我が国の浮体式風力発電の整備促進や、将来の海洋資源活用におけるプラットフォーム構築の際の参考になれば幸いです。

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.
- 2) 田村大樹、新里英幸、大窪慈生、三谷俊輔：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、Hitz技報、**2019**.
- 3) Kosasih, K-M-A, Suzuki, H., Niizato, H. and Okubo, S. : Demonstration Experiment and Numerical Simulation Analysis of Full-Scale Barge-Type Floating Offshore Wind Turbine, Journal Marine Science and Engineering, **2020**.

文責者

日立造船株式会社 機械・インフラ事業本部
開発センター 海洋環境グループ
竹内海智
Tel : 080-6111-4141
E-mail : takeuchi.k@hitachizosen.co.jp

Floater/Mooring Design Verification in Demonstration Study of Barge-type Floating Offshore Wind Turbine

Abstract

Since 2019, Hitachi Zosen has been conducting demonstration studies of a barge-type floating offshore wind turbine (hereinafter referred to as "floater") installed off the coast of Kitakyushu as part of the "Next Generation Floating Offshore Wind Power Generation System Demonstration Study" commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). In this paper, we present the verification results of a comparison between the calculated value obtained from a coupled analysis model and the observed value of the performance of the floater and the mooring system.

In general, floating structures are subject to both natural external forces such as waves, winds, and currents, and to reaction forces from mooring lines. The main task of the mooring design is to find the motion of the floating structure in this state and to obtain the variations in the mooring force caused by it. Therefore, we confirmed that the mooring force in the observed data was generally consistent with and within the allowable range of the design results, and verified the validity of the design conditions and the analysis and verification methods used in the design.

As for the floater design, we focused on the high waves of December 30, 2020, and used the observed wave, wind, and current data to carry out a coupled analysis of the floating and mooring components, and then compared the calculated and observed values of the floater motion and mooring force. The results confirmed that on the whole, the mooring force acting on the floater had been reproduced. In this analysis, we developed a model of the viscous damping term for solving the equation of the floater motion based on the results of the water tank experiment, and confirmed the high effectiveness of the model.

Authors

Kaichi Takeuchi (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : takeuchi.k@hitachizosen.co.jp)
Hideyuki Niizato Hiroki Tamura Sigeki Ohkubo Shunsuke Mitani Takeshi Hara