

1. はじめに

平成 24 年（2012 年）3 月に開始された経済産業省からの委託事業「福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」¹⁾では世界初の浮体式洋上ウインドファームを建設した。洋上には 4 基の浮体、「ふくしま絆」（サブステーション）、「ふくしま未来」（2MW）、「ふくしま新風」（7MW）、「ふくしま浜風」（5MW）があり、本稿ではそのうち、2MW 風車を搭載した「ふくしま未来」の実証試験概要を述べる。「ふくしま未来」は 2013 年 11 月に発電を開始し、その後順調に稼働して現在に至っている。搭載している風車は日立製作所製ダウンウインド型風車（HTW2.0-80）である。

2. 設計

風車と浮体の設計は風車メーカーと情報をやり取りして実施した。参照した規則は日本海事協会の「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン」²⁾である。浮体設計では以下の項目について配慮した。

- a) 安全性
- b) 風車からの制限（傾斜角度，加速度）
- c) 送電線からの制限（移動距離）
- d) 無人施設，無人運転
- e) 設置工事，曳航工事
- f) 周辺航行船舶への配慮
- g) O&M（アクセス性など）

気象海象条件は文献³⁾で記述されている波，風，水流とした。暴風時は 50 年再現の波，風，水流を風車浮体において最も厳しい条件となる同一方向から受けると仮定した。疲労強度検討でも同様の方向として 20 年間の疲労被害度を算定し安全性を確認した。風車稼働時の数値解析は BLADED⁴⁾を用いて風車浮体の連成解析を実施した。BLADED は長波頂波での解析であり，波方向の分散性は考慮していない。

設計に際し，水槽試験を実施し，基本的な浮体挙動と曳航時の安定性などを確認した。水槽試験の実

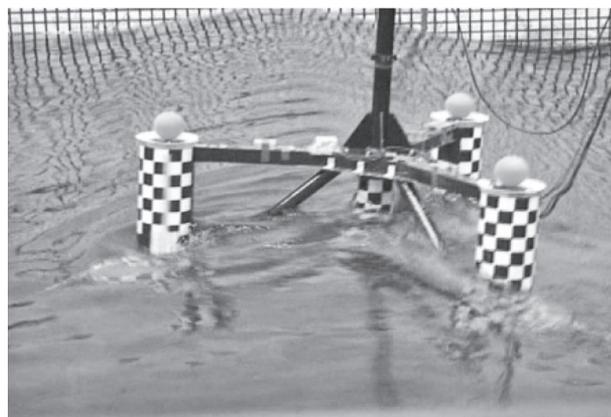


図 1 水槽試験実施状況

施状況例を図 1 に示す。

係留は 6 本のチェーンとドラッグ式アンカーで構成される。チェーンの呼び径は 132mm，フェアリーダを通してデッキ上のストッパで固定される。50 年再現の気象海象条件で数値解析を実施し安全性を確認した。疲労強度は波風水流が同一方向から来ると仮定し，20 年間の気象海象発現時間と張力から累積疲労被害度を算出し，安全率を満足することを確認した。設計開始から数ヶ月後に海底土質調査が実施され，本風車浮体設置場所は砂泥層が薄く，その下は泥岩であることが判明した。対応するドラッグアンカーを再選定し，設計変更には至らずに済んだ。

浮体の要目を表 1 に示す。搭載風車は日立製作所製 HTW2.0-80，出力 2MW，ロータ直径 80m，ダウンウインド型である。風車のハブ・ナセルは陸上仕様のものに，浮体が傾斜することによって問題

表 1 浮体要目

浮体形式	半潜水型の洋上風力発電船
長さ	57.50m
幅	64.23m
深さ	32.00m
計画喫水	16.00m
船級	日本海事協会
設計水深	120m

* (株)三井 E&S エンジニアリング

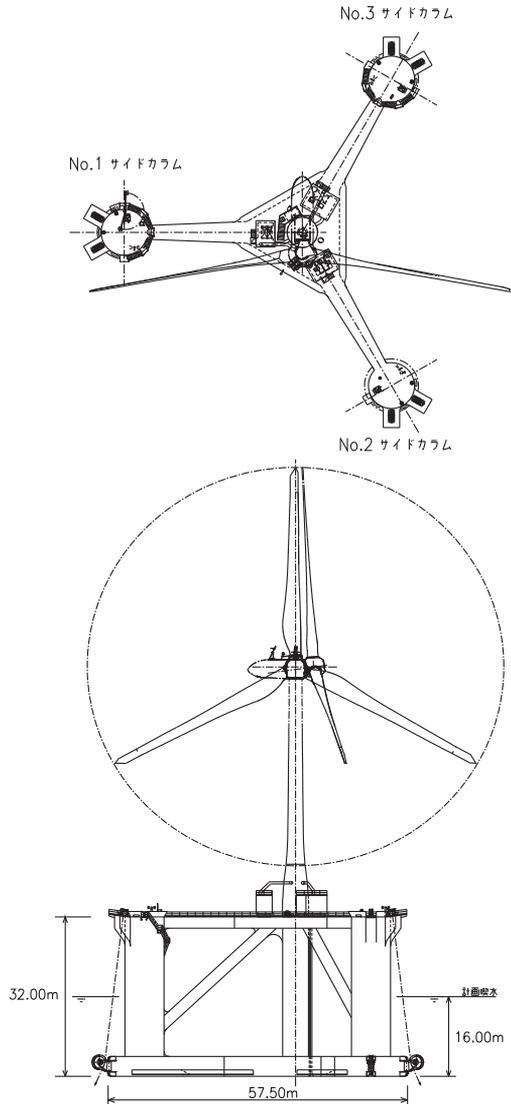


図2 「ふくしま未来」

となる増速機からオイルが漏れないようにする改造を行った。タワーの構造強度は日本海事協会のガイドライン²⁾および土木学会「風力発電支持構造物設計指針・同解説」に従って実施した。開口部を含むタワー、フランジ、ボルト等について降伏強度、座屈強度および疲労強度について評価を行い、当該規則を満足していることを確認した。

図2に風車浮体の平面図と側面図を示す。浮体は4本のコラムで構成され、中心の1本に風車を搭載している。メンテナンス性を考慮して変圧器などはデッキ上に配置した。

3. 発電施設建設⁵⁾

上述の設計に従い、浮体を建造し、風車組立てを三井E&S造船千葉事業所で行った。風車組立状況を図3に示す。



図3 風車の組立て



図4 曳航状況

浮体上への風車組み立て完了後、小名浜港への曳航を開始した。曳航時の状況を図4に示す。曳航中は過度な傾斜を風車に与えないように傾斜計を浮体に搭載し、モニタリングを行った。

小名浜岸壁での作業中に暴風状態になることを想定し、浮体を着底した。着底はあらかじめ海底に造成したマウンドの上に行っている。小名浜岸壁では風車の調整を行った。

係留索は海底に展開後、把駐力試験を行った。この把駐力試験は台船上に配置した油圧式牽引装置(プラーユニット)に対となる係留索の1本を結合し、他の1本を台船に固定し実施した。本試験は、日本海事協会の立会のもと実施している。日本の洋上でこのような大荷重の把駐力試験は過去例がない。把駐力試験の状況を図5に示す。

把駐力試験完了後、クレーン台船を用いて係留索を浮体に引き込みストッパに固定した。次に海底ケーブルを引き込み風車に接続した。受電後に風車の最終調整を行い、発電を開始した。



図5 把駐力試験

4. 稼働状況

2013年11月の発電開始から2018年9月まで風車、浮体とも大きなトラブルはなく、現在に至っている。

2015年8月2日16:28に落雷を検知した。その後詳細な点検実施とその評価終了まで風車を停止した。詳細なブレードの点検を行った結果、異常はなく、9月30日に発電を再開した。雷検知器の測定では -3.9kA であった。図6に浮体に搭載したカメラで落雷をとらえた様子を示す。高速撮影ではないので残像があるが、ブレード先端近傍に落雷していることがわかる。

2018年3月までの乗船日数を表2に示す。()内は乗船日数のうち、風車作業として乗船した日数である。2017年度は風車O&Mが当社所掌から除外された。浮体の点検修理作業で乗船した日数は最大で年間5日である。

浮体へのアクセスは乗船補助装置を備えた双胴型



図6 落雷を受ける風車

表2 点検等日数 ()内風車関連

	乗船日数		
	定期点検	修理等	その他
2013年度	7 (7)	4 (4)	0 (0)
2014年度	19 (15)	7 (6)	3 (1)
2015年度	9 (8)	2 (1)	2 (0)
2016年度	12 (9)	0 (0)	3 (0)
2017年度	3	0	1



図7 浮体へのアクセス

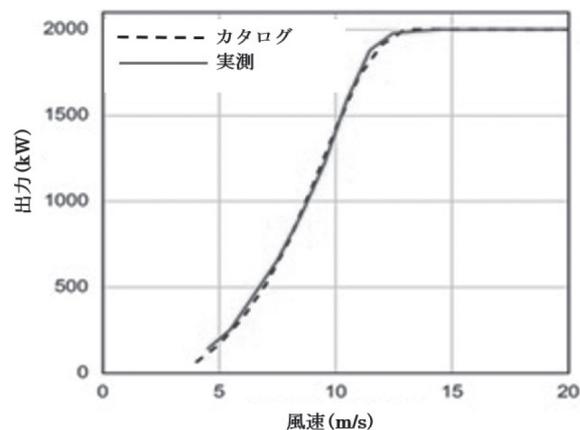


図8 パワーカーブ

作業船を用いている。図7にアクセスの様子を示す。

風車の定期点検は基本的には半年に1回点検を実施した。ただし、1年目の半年点検以降は半年ごとの点検の間の3ヶ月に1回の目視点検(3ヶ月, 9ヶ月点検)も実施した。

図8に風速と発電量の関係を示す。実線は実測値、点線はカタログ値である。実測値における風速は2km離れたサブステーションの計測結果を風速BINごとに平均している。動揺する浮体に搭載された洋上風車でも陸上と同等な発電が得られている

ことがわかる。

2013年12月から2018年6月までの平均設備利用率は32.5%⁶⁾、最高設備利用率は2017年1月の53.0%、その月の平均風速は8.9m/sであった。

5. 計測

浮体風車のモニタリングではSCADAの他に、タワー歪、タワー加速度、浮体位置、浮体傾斜、浮体構造歪などを計測している。

設計で用いた数値解析手法の精度を確認するため、検証解析を行った。気象海象条件はサブステーションで観測された数値を用い、これをBLADEDに入力し、結果を計測された浮体の挙動と比較した。その結果、BLADEDを用いた解析結果は安全側となることを確認した。BLADEDでは長波頂波を仮定しているので安全側の結果を与えると推察される。

図9に実証試験計測の例を示す。2017年10月2日の風車点検において緊急停止試験を行った。発電状態から緊急停止を行うと、風車からのスラスト力を受けて傾斜している浮体は自由動揺状態となる。図9は浮体傾斜の計測結果である。この傾斜時刻歴から浮体の動揺減衰がわかる。設計時には水槽試験で動揺減衰係数を同定しているが、図9から得られた動揺減衰係数のほうが大きく、水槽試験で得られた動揺減衰係数は安全側であることが確認できた⁷⁾。

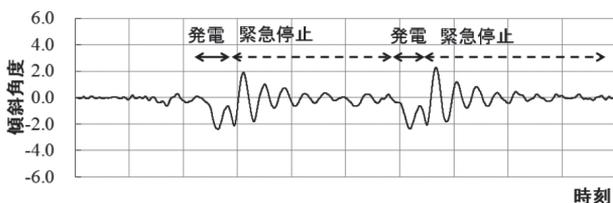


図9 緊急停止時浮体傾斜

6. まとめ

本実証試験を通じ、設計手法、建設方法、O&M手法などについて貴重な知見が得られた。また、実海域における風車と浮体の挙動データを取得した。

これら知見から、セミサブ型浮体を支持構造とした風車を用いて日本の海で発電が可能であり、発電量は陸上と同等であることを示すことができた。今後はコスト低減に取り組み、浮体式洋上風力発電の商用化に資する予定である。

実証試験を実施するにあたり、福島洋上風力コンソーシアムのメンバーをはじめ、関係省庁、自治体、地元の方々には多大なご協力をいただいた。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) <http://www.fukushima-forward.jp>
- 2) 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン、2012年7月、日本海事協会
- 3) Takeshi Ishihara, Kenji Shimada, Akihiko Imakita: "METOCEAN DESIGN CONDITION FOR "FUKUSHIMA FORWARD" PROJECT", Grand Renewable Energy 2014, July27-August 1
- 4) Bladed User Manual, Ver. 4.2, 2011, GL Garrad Hassan
- 5) 福島浮体式洋上風力発電施設建設工事、作業船、2014年4月、No.315, p9-14, 日本作業船協会
- 6) 平成30年度福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会報告書、福島沖での浮体式洋上風力発電システム実証研究事業総括委員会、2018年8月
- 7) Hiroshi Yamaguchi, Akihiko Imakita: Learning from Field Test Regarding Damping of a Floater Motion - 2MW FOWT "Fukushima Mirai"-, Grand Renewable Energy 2018, International Conference and Exhibition, June17-June 22, 2018



今北 明彦 (いまきた あきひこ)
 (株)三井E&Sエンジニアリング
 環境・エネルギー事業部 第一プロジェクト部
 担当部長
 船舶・海洋構造物 構造設計, 強度解析
 imakita@mes.co.jp