

## 4 浮体式洋上風力発電の 促進のための技術開発

中條 俊樹\*, 黒岩 隆夫\*

Technological Developments of Floating Offshore Wind Turbines and  
Activities in National Maritime Research Institute

by

CHUJO Toshiki and KUROIWA Takao

### Abstract

To utilize floating offshore wind power generation, significant cost reduction is necessary. In this report, NMRI's technological developments to enable the cost reduction are described, along with examples of overseas studies. In case of floating structures, it is important to evaluate the coupling of the wind turbine, floating structure and mooring. For the mooring, a comprehensive study including installation work is necessary while aiming for cost-optimal specifications using synthetic fiber cables. For the floating structure, NMRI has begun study on 'Digital Twin'.

---

\* 洋上風力発電プロジェクトチーム

原稿受付 令和 4年 5月 10日

審査日 令和 4年 5月 26日

## 1. はじめに

近年の我が国における洋上風力発電については、「洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会」が洋上風力産業ビジョン（第1次）<sup>1)</sup>において、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札と位置付け、導入目標を2030年までに1,000万kW、2040年までに浮体式も含む3,000万kW～4,500万kWの案件を形成すると発表する等、普及促進に向けた機運が高まっている。

欧州では、洋上ウィンドファームの大規模化が進む中、浮体式洋上風力発電も着実に普及が進んでいる。我が国では、大規模ウィンドファームの建設が進んでいる。さらに、我が国周辺の洋上風況や海底地形、沿岸域の利活用状況を鑑みると、浮体式洋上風力発電は上記目標の達成に不可欠であると考えられる。

本稿では、浮体式洋上風力発電の普及促進に必要な技術開発について、その現状と海技研の取り組みについて述べる。

## 2. 浮体式洋上風力発電の現在

我が国におけるこれまでの実証試験を表-1に示す。福島県沖の浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業においては、執筆時点（2022年5月）ですべて撤去されており、稼働中の浮体は2基である。

表-1 日本の浮体式洋上風力発電施設

FOWT	Site	Floater	Turbine	Status
Haenkaze	Nagasaki	Spar	2MW	Operating
Mirai	Fukushima	Semi-submersible	2MW	Removed
Hamakaze		Spar	7MW	
Shinpu		Spar	5MW	
Hibiki	Fukuoka	Barge	3MW	In test
Squid	Saga	Spar	1MW	Sank

表-2に示す欧州の浮体式洋上風力発電は、複数浮体による商用展開が開始されている他、実証試験後に商用ウィンドファームに転用される等、様々な形で実用化が進んでいる。

表-2 欧州の浮体式洋上風力発電施設

FOWT	Site	Floater	Turbine	Status
Hywind Demo	Norway	Spar	2.3MW	Operating
Windfloat Demo	Portugal	Semi-submersible	2MW	Moved
Hywind Scotland	Scotland	Spar	6MW×5	Operating
Hywind Tampen	Norway	Spar	8MW×11	Constructing
Kincardine	Scotland	Semi-submersible	2MW+9.6MW×5	Operating & constructing
Floatgen	France	Barge	2MW	In test

## 3. 浮体式洋上風力発電の技術開発の現在

浮体式洋上風力発電のさらなる普及のためには発電コストの低減が必要であるが、そのための技術開発として、例えば Carbon Trust による研究開発プロジェクトである Floating Wind JIP<sup>2)</sup>では、Phase I から Phase III にかけて、表-3に示す検討が実施された。

表-3 Floating Wind JIP における主な研究開発項目

Phase	R&D
Phase I (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mooring System</li> <li>Infrastructure &amp; logistics</li> </ul>
Phase II (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heavy lift offshore operations</li> <li>Monitoring and inspection</li> </ul>
Phase III (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heavy lift offshore maintenance</li> <li>Tow to port maintenance</li> </ul>

これらの研究開発で明らかになった重要な知見や必要な技術開発は以下の通りであり、我が国における普及促進にも有用な項目が多く含まれている。

### • Mooring System

- 合成繊維索はコスト低減につながる可能性があるが長期間の使用には技術開発や認証が必要である。
- 係留システムの設置工事は主要なコスト要因であり、設計、施工の緊密な連携が必要である。
- トップコネクターとアンカーは設置工事の中で主要要素であり、簡便で低コストの方策が必要である。
- アンカー共有化はコスト低減につながる可能性があるが、導入の難易度が高い。
- モニタリング、検査技術が必要である。

### • Infrastructure & logistics

- 現在のドライドックでの浮体建造は、経済的に不利であり、埠頭での連続建造方法が必要である。

### • Heavy lift offshore operations

- 大型風車の設置に使用できる起重機船は限られている。将来の大型化への対応が必要である。
- 吊荷の3次元動揺補正やクライミングクレーンが必要である。

### • Monitoring and inspection

- デジタルツインで使用されるセンサー類やUSV(Unmanned Surface Vehicle)、ROV(Remote Operated Vehicle)などは有人のモニタリング・検査に代替可能な選択肢となる。
- デジタルツインのセンサー類の入力に連動した確率モデルの開発、浮体式風車の正確なモデル化が必要である。
- 係留モニタリングシステムの実装が必要である。

### • Heavy lift offshore maintenance

- 部品交換時のコスト削減のため、クレーンの普及スピ

ードが重要である。

- 現状、船舶搭載型クレーンが洋上でのメンテナンスには最適であり、他の技術はさらなる開発が必要である。

• Tow to port maintenance

- 係留やケーブルの切断・再接続を統合的に行うことで、メンテナンス時間を大幅に短縮できる。
- 仮設ケーブルジョイントによりメンテナンス期間の短縮が期待できる。

4. 海技研の取り組み

海技研ではこれまで、文献<sup>3) 4)</sup>に示すような浮体の安全性を中心に研究を実施してきた。本稿では最近の研究について述べる。

4.1 合成繊維索を用いた係留系

合成繊維索を用いた係留系は、コストの観点から有望視されているが、浮体式洋上風力発電の設置が想定される、水深50~100m程度の海域での実績が少ないこと、浅い海域では一般的に設計の難易度が上がること、繊維索の荷重-変位特性や疲労特性が索素材により大きく異なる等により、実現にはまだ課題が残されている。海技研ではこれまで、合成繊維索を用いた係留系の評価手法を報告している。IEA(International Energy Agency)により実施されている数値解析コード検証<sup>5)</sup>(OC4: Offshore Code Comparison Collaborative Continuation)における参加機関共通の解析対象浮体を用い、風車-浮体-係留の連成解析を実施した。この解析から明らかになった、合成繊維索を用いた係留系設計上の留意点として、以下が挙げられる<sup>6)</sup>。図-1および表-4にOC4浮体を対象として試設計を実施した概略図と係留系の仕様をそれぞれ示す。

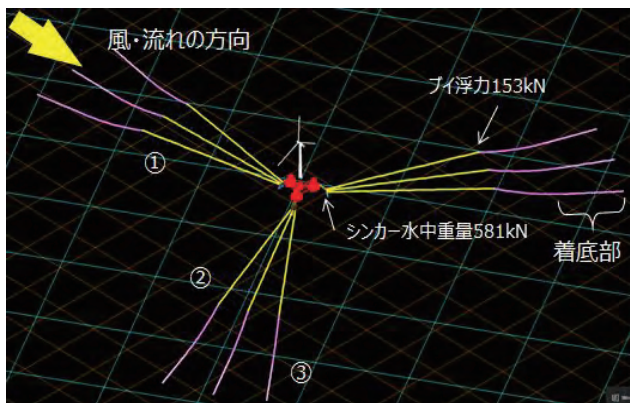


図-1 合成繊維索係留の試設計結果<sup>6)</sup>  
(黄色：合成繊維索、ピンク：鋼製チェーン)

- 係留張力は風・波・流れの入射方向が同一方向の条件で最大となるとは限らない。
- 波の方向分布は一方向波による解析が安全側とは限らない。最大張力となる海象条件は、定格風速で波高が高く波

周期が短い条件である。

- 最大張力の発生箇所は、海底着底点近の場合もあり得る。
- 最大張力の推定にはランダムシードを変えた複数回の時系列計算が必要であるが、一定の解析結果に到達するまでの解析回数については、今回の解析では20回程度で収束した。
- 最大疲労被害度の発生箇所は最大張力発生個所と一致しない場合がある。

表-4 合成繊維索係留の試設計結果<sup>6)</sup>

Item		Specification
Water depth		64 m
Number of lines		9
Upper chain	L	25 m
	Diameter	81 mm
	MBL	5490 kN
Rope	L	300 m
	Diameter	167 mm
	MBL	5472 kN
Bottom chain	L	270 m
	Diameter	81 mm
	MBL	5490 kN
Sinker	Weight in water	581 kN
Buoy	Buoyancy	153 kN

海技研では、実海域に設置された浮体による検証を想定しつつ、繊維索素材、適用水深等の観点でより広範に適用可能な合成繊維索を用いた係留系の設計手法の確立を目指す。

また、生物付着による強度への影響や係留系の設計時に考慮すべき付着量(重量、厚さ)が明確になっていない。そこで、国内の複数海域で水産施設の係留に用いられている合成繊維索への生物付着量の調査や実海域に繊維索試験体を浸漬して付着量の計測と強度評価を実施している。図-2に石狩湾における付着の様子を示す。単位長さ当たりの水中重量は最大で300 kgf/m程度が観測された。なお、浸漬後の強度評価は、浸漬開始から2年後に予定している。

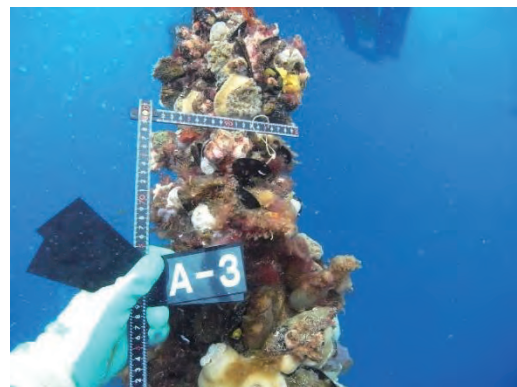


図-2 合成繊維索の付着生物の様子(石狩湾)<sup>7)</sup>

#### 4.2 デジタルツイン技術の開発

デジタル上に実機と同等の仮想モデルを構築し、実機と同様の海気象を作用させると、実機に発生する荷重や疲労を精度よく評価可能となる。

海技研では、デジタルツイン技術の開発のため、まず風車一浮体一係留の連成解析技術に、浮体構造強度評価を加える開発を実施している。現時点では浮体を梁モデルで構成し、梁の断面剛性を想定実機の設計結果から与えるとともに、モリソン式に基づく流体力を入力している。図-3 に浮体モデルのイメージ図を、図-4 にタワー基部の曲げモーメントの出力結果を示す。今後はより精度を高めた解析手法を開発し、実海域における計測結果を用いた検証を行い、デジタルツイン技術の確立を目指す。

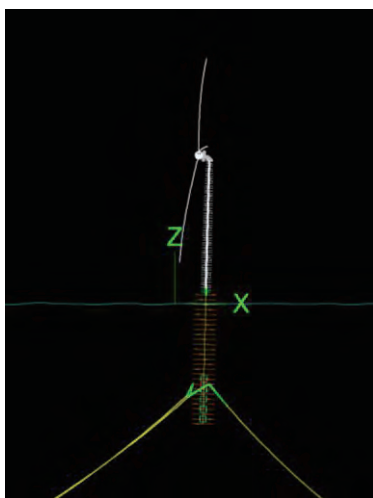


図-3 15MW 風車搭載スパー型浮体の数値計算モデル<sup>8)</sup>

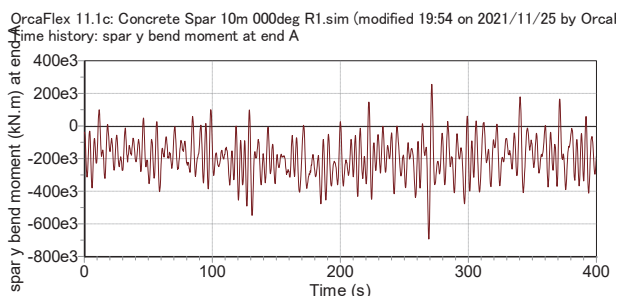


図-4 15MW 風車搭載スパー型浮体の強度評価例

#### 4.3 モニタリング及び検査

実証試験の期間中においてモニタリング項目は多く、かつ検査間隔も短いですが、商用展開では運用コスト削減のため、これらは減少していく。海技研では、国土交通省海事局による請負研究を通じて安全ガイドラインの改訂を実施しており、モニタリングや検査についても、浮体式洋上風力発電の普及促進につながるよう検討を実施している。

主な検討内容を以下に示す。

- 現状の有人あるいはセンサーによるモニタリングシステムを代替可能な、効率的かつ安全なモニタリングシステムの検討
  - 有人かつ浮体上での検査手法を代替可能な遠隔からの検査手法の検討
  - 複数浮体から構成されるウィンドファームを想定した、一部浮体を検査対象とする、いわゆる代表基検査の適用可能性の検討
- 現時点では検討途中であるため、その成果は検討終了後に報告予定である。

#### 5. まとめ

我が国における浮体式洋上風力発電の普及に有用と思われる技術開発について、欧州の検討事例と海技研における取組を紹介した。

#### 謝辞

本報告で紹介した研究の一部は、国土交通省海事局からの請負業務、あるいはNEDO先導研究プログラム(JPNP14004)/エネルギー・環境新技術先導研究に基づいている。関係各位に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省, 洋上風力産業ビジョン(第1次), 2020.
- 2) Carbon Trust, Floating Wind Joint Industry Project (JIP), <https://www.carbontrust.com/our-projects/floating-wind-joint-industry-project-jip>
- 3) 石田茂資, 中條俊樹, 羽田絢ら, 浮体式洋上風力発電システムの技術開発・安全性評価, 海上技術安全研究所報告第16巻第2号特集号(平成28年度)総合報告, pp.107-126, 2016.
- 4) 中條俊樹, 羽田絢, 藤原敏文ら, 浮体式洋上風力発電施設の損傷時復原性基準合理化に関する検討, 令和元年(第19回)海上技術安全研究所研究発表会, 2019.
- 5) A. Robertson, J. Jonkman, et. al., Offshore Code Comparison Collaboration Continuation Within IEA Wind Task 30: Phase II Results Regarding a Floating Semisubmersible Wind System, National Renewable Energy Laboratory, NREL/CP-5000-61154, 2014.
- 6) 中條俊樹, 浮体式洋上風力発電の合成繊維索を用いた係留系の設計について, 令和3年度海上・港湾・航空技術研究所 研究発表会, 2021.
- 7) CHUJO Toshiki, KOJIMA Ryuji and HANEDA Ken, Investigation of Biofouling on Synthetic Fiber Rope for Safety Criteria of Floating Offshore Wind Turbines Mooring Design -Investigation in Hokkaido-, Underwater Technology 21, 2020.
- 8) 黒岩隆夫, 陳曦, 15MW 風車用スパー型浮体の予備検討, 第43回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.20-23, 2021.