

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

石原 孟

1. はじめに

福島復興のために、丸紅株式会社（プロジェクトインテグレータ）、東京大学（テクニカルアドバイザー）を中心とした 11 社からなるコンソーシアムが経済産業省の委託を受け、福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業に取り組んでいる¹⁾。第 1 期工事では、世界初の浮体式洋上変電所、2MW 浮体式洋上風車、海底ケーブル等を設置し、第 2 期工事では、さらに世界最大級の 7MW の浮体式洋上風車を 2 基建設する予定である。

本稿では世界初の浮体式洋上ウィンドファームの実証研究の概要、第 1 期実証研究の設置工事および観測システムの概要について紹介する。

2. 本実証研究の概要と課題

浮体式洋上風力発電は、数年前からノルウェーやポルトガルで実証研究が始まっている。また国内においては五島列島沖浮体式洋上風力発電の実証研究が開始している。しかし、これらのいずれの実証研究も浮体式洋上風力発電設備 1 基のみを建設し、将来大規模浮体式洋上ウィンドファームを実現するにはいくつかの技術的な課題が残されている。

福島県沖合の実証研究では、世界最大級の 7MW 風車を用いることにより、浮体式洋上風力発電の事業性の検証を可能にすると共に、世界初の浮体式洋上変電設備および 66kV の大容量ライザーケーブルを開発することにより、浮体式洋上ウィンドファームの建設を可能にする。また本実証研究では浮体式洋上観測システムを構築し、浮体の動揺を考慮した気象・海象の観測手法を確立すると共に、浮体式洋上風力発電の性能評価を可能にする。さらに複数タイプの風車と浮体を用いることにより、各種浮体式洋上風力発電システムの特性および制御効果を明らかにすると共に、腐食および疲労に強い高性能鋼材の開発も行う。本実証研究を通じて、我が国の

自然環境条件に適合し、安全性、信頼性、経済性の高い浮体式洋上風力発電技術を確立する。

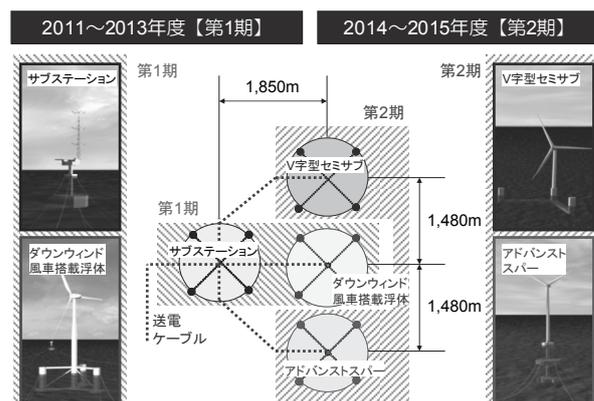


図 1 浮体式洋上ウィンドファームの計画

図1には本実証研究の計画を示す。第1期の実証研究では、2013年度までに25MVA の変電設備を搭載する世界初となる浮体式洋上サブステーションおよび2 MW ダウンウインド型風車搭載の浮体式洋上風力発電設備1基を建設し、様々な要素技術の開発を行うと共に、浮体式洋上風力発電設備設計に必要な気象・海象・浮体動揺等の基礎データを取得する。第2期実証研究では、今後の事業化を見据えて、2015年度までに世界最大級の7 MW 風車搭載の浮体式洋上風力発電設備2基を建設すると共に、大型風車搭載の浮体式洋上風力発電設備による大規模ウィンドファームの事業性を検証する。

表 1 には本実証研究における主な研究課題を示す。浮体式洋上風力発電所の事前調査では実証研究実施に先立ち、実施海域を設定し、事前協議並びに基本設計を行い、事業性を評価するとともに、実証研究の実施計画書を作成する。2012年に第1期の実証研究の事前調査を行い、2013年に第2期の実証研究の事前調査を行った。

本研究では気象・海象・浮体動揺の観測システムを構築すると共に、浮体動揺の影響に対する補正技

術を開発し、浮体式洋上風力発電システムの設計に必要な気象、海象の観測を行う。浮体式洋上風力発電設備においても浮体動揺、応力・係留力の計測を行い、本実証研究で開発された設計手法および動解析モデルの検証を行う。

表 1 本実証研究における研究課題

項目	研究課題
1	浮体式洋上風力発電所の事前調査
2	対象海域での気象・海象・浮体動揺の観測と予測技術の開発
3	我が国の洋上環境に適した浮体式洋上風力発電システムの開発
4	浮体式洋上風力発電所のための送変電システムの開発
5	浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の確立
6	環境影響評価・航行安全性・漁業との共存
7	浮体式洋上風力発電の共通基盤の整備とマニュアルの作成
8	国民との科学・技術対話

図 2 には浮体式洋上の完成予想図を示す。本実証研究では、3つのタイプの浮体式洋上風力発電システムを開発し、実証研究を通じて、それぞれの浮体形式の安全性、信頼性、経済性を検証すると共に、世界初の商業用浮体式洋上風力発電システムを実現する。7MW 風車を搭載する浮体は3万トンのタンカーと同規模の5000トンの鋼材が使用される。本実証研究では日本独自のハイテン鋼 TMCP を適用することにより、溶接時間や建設時間の短縮および建設コストの削減を実現する。また溶接部の超音波衝撃処理を実施することにより、疲労強度を向上させ、実証試験を通じてその効果を確認する。

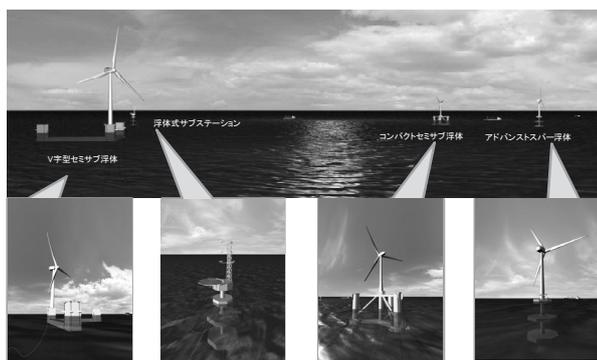


図 2 浮体式洋上ウインドファームの完成予想図

本実証研究では浮体式風力発電から洋上変電所、陸上変電所に至る送変電システムを開発すると共に、動揺の小さい浮体および動揺に強い変電設備、大容量ライザーケーブルを開発する。また実際に設置した浮体式洋上変電所を運用し、計測した気象・海象・動揺データ並びに送変電設備の振動と応力データを用いて、浮体式洋上送変電設備の性能評価を行う。風車で発電された電力は洋上変電所で 22kV から 66kV に昇圧され、地上変電所を経由して電力系統に接続される。

陸上風力発電所と異なり、発電所へのアクセスは格段に難しくなるため、浮体式洋上風力発電所の維持管理手法の確立は重要である。遠隔監視システム等を開発することにより、設備稼働率を向上させるとともに、浮体式洋上風力発電設備の維持管理手法を確立する。

社会的合意は洋上風力発電を行う上で極めて重要である。本実証研究では、漁業等との共存方法を具体的に検討し、周辺海域の調査、漁獲試験の実施、漁船の安全操業、集魚効果の把握、新たな漁法の検討等を地元漁業関係者と一緒に行う。また航行安全性の評価では航行シミュレーション等の予測技術を開発すると共に、対象海域の航行船舶の調査を実施することにより、衝突リスクを定量的に評価し、低減対策を提示する。さらに環境影響評価では、海鳥、海洋哺乳類、魚などについて調査すると共に、風車の設置および海底ケーブル敷設に関連する環境影響評価を行う。

国民との科学・技術対話では本実証研究の成果をホームページ、ワークショップ、シンポジウムなどを通じて、国内外に情報発信すると共に、地方自治体とも連携して、定期的に見学会や説明会を開催し、本実証研究への地元理解と支援を得る。

3. 浮体式洋上風車の施工

2013年4月1日から世界初の浮体式洋上ウインドファームの建設を1年にわたる漁業関係者との協議を経て開始した。以下、浮体式洋上風車の設置工事について紹介する。

「ふくしま未来」と名付けられた 2MW ダウンウインド型浮体式洋上風力発電設備は三井造船の千

葉事業所で製造し、2013年6月25日に完成した。風車ローターの直径は80m、海面からハブまでの高さは66m、海面からブレード先端までの高さは106mに達する。一方、浮体に関しては幅64m、深さ32m、計画喫水16mである。実証研究では浮体式に合わせて設計された最適制御の実証を行うと共に、浮体の動揺と傾斜考慮した変圧器やスイッチギヤの性能検証も実施する。「ふくしま未来」は6月28日三井造船の千葉事業所から東京湾を出発し、7月1日に福島県いわき市の小名浜港に到着した。

図3には曳航中のふくしま未来を示す。曳航船団は6000馬力クラスの主曳船、4000馬力クラスの補助曳船2隻を前方に配置、4000馬力クラス曳船を後方に配置した。その他、側方警戒船、前方警戒船、さらに前に高速船を配置し、航路の安全を確認しながら曳航作業を行った。曳航作業中は、浮体の挙動をリアルタイムに観察し、風車に対して過剰な加速度、傾斜が生じないように曳航速度を調整した。また、航路内にある漁業場の漁業時間帯を避ける目的でも速度調整を行った²⁾。



図3 曳航中のふくしま未来

2MW級洋上風力発電船「ふくしま未来」の係留には自重35tの特殊アンカーと国内最大断面径132mmのチェーンを使用した。本設チェーンは6条を用いた。係留チェーンは施工時及び完成後にキンク等が生じないようにする必要がある。チェーン敷設船に係留チェーンを積み込むまでの作業プロセスの中に、ねじれを解消するプロセスを組み込む必要がある。作業性を考え、ふ頭上で塊状のチェーンを展張し、ねじれを解きながらすだれ状に並べ、そのままの形でアンカー・チェーン敷設船に積み込む施工方法を採用した。



図4 敷設船への係留チェーン積込状況

図4には吊り天秤を用いた敷設船への係留チェーン積込状況を示す³⁾。整理したチェーンをそのままの状態ですり上げるため、専用の吊り天秤を製作した。この吊り天秤を使用することにより、500t吊りクレーン台船が吊り上げられる最長の330m分のチェーンを一機に吊り上げることができる。この吊り作業を2回繰り返すことで、係留アンカー・チェーンの敷設船に所定の長さ660m分のチェーンを1日で積み込むことができた。

係留アンカーの効き具合を確認するため、係留アンカー・チェーンに作用する最大設計張力を作用させ、15分間その状態を維持することを確認する引張試験(把駐力テスト)が必要である。試験荷重を作用させるためには、係留チェーンを海面位置において600tの力で引っ張ったり、引き上げたりする施工機械が必要であった。ウィンチは150tの巻上げ能力が最大であり、常時、波浪がある現地海域では、クレーン台船の使用は重い吊りフックが大きく動揺するため危険である。そこで、油圧により作動するプラーユニットを採用した。



図5 600t プラーユニット

600tに対応できる仕様は存在しなかったため、今回新規に設計・製作し、作業台船上に艀装した。

向かい合う 1 対の係留チェーン端末を作業台船上に引き上げ、片側をチェーンストッパーに固定し、他方をプラーユニットにセットして牽引した。図 5 には 600t プラーユニットを示す³⁾。洋上風力発電船の曳航・設置工事においては、最も難易度が高い作業は浮体係留である。浮体デッキ上のチェーンストッパーに、事前に海底に仮置きした係留チェーンを取り付けるため、洋上でクレーン作業を行う必要がある。波浪の中で浮体は動揺し、クレーン台船も揺れるためにクレーンフックが振れる。浮体もクレーンフックも異なる揺れ方をする中での揚重作業である。洋上風力発電船を曳航船 2 隻で保持しながら、500t 吊クレーン台船を洋上風力発電船の近傍に配置し、チェーンストッパー上側のチェーンを引き上げ、クレーン揚程分毎にチェーンを切断しながらチェーンに設計の張力が作用するまでこの作業を繰り返した。図 6 には完成した 2MW 浮体式洋上風車を示す³⁾。



図 6 完成した 2MW 浮体式洋上風車

このように、様々な困難を克服し、本実証研究は 2013 年 11 月に第 1 期の 2MW 浮体式洋上風車の建設が完成した。

4. 浮体式観測システムの構築

実証研究海域での気象・海象・浮体動揺の観測は、浮体式洋上風力発電設備の設計・設置・運用に係る基盤技術であり、国際基準の策定にも重要な役割を果たす。浮体式サブステーションの観測システムには「観測データの信頼性確保」と、「欠損無くデー

タを連続取得すること」が求められている。

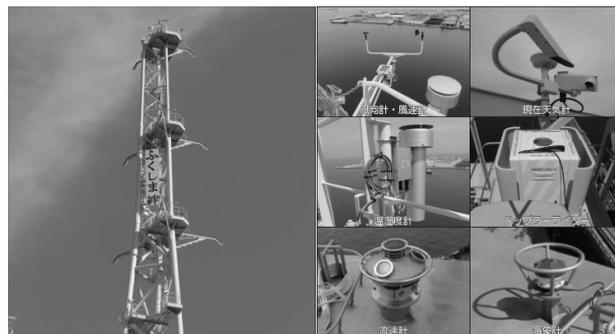


図 7 気象・海象・浮体動揺の観測システム

図 7 には気象・海象・浮体動揺の観測システムを示す。浮体式サブステーションが設置されている沖合 20km と陸上とは気象データの相関が小さく、陸上の気象台で観測されているデータを信頼性確認のために参考にはできない。そのため、今回の観測システムを構築する過程において、以下の点を工夫した。

- 1) 観測データの信頼性を確保するため、1 つの観測項目に対して、複数種類の観測機器を設置し、相互確認を行う。
- 2) 複数種類の観測機器を設置することにより、いずれかの機器に不具合が生じても他の機器で補い、欠損無くデータを連続的に取得する。
- 3) 観測機器の設置位置は、メンテナンスの作業性を考慮して決定する。

(a) 気象観測

風況観測については、マスト高度(稼働喫水からの高度)40m, 50m, 60m の 3 高度で、計 3 本のブームを方位角 120°間隔で水平に張出し、その先端に三杯式風速計、矢羽根式風向計、超音波式風向風速計を設置している。また、デッキ上にはリモートセンシング技術の 1 つであり、近年風力発電分野での導入が進みつつあるドップラーライダーを設置している。ドップラーライダーは 40m から 290m の高度までの風向風速を観測できる。風速、風向に対してそれぞれ 3 種類の観測機器による相互確認を行うことができる。

図 8 に浮体式サブステーションで観測した 1 週間(2014 年 10 月 5 日~11 日)の時刻歴データを示し、マスト高度 40m における三杯式風速計、矢羽根式風向計、超音波風向風速計およびドップラーライダーに

よって観測した 10 分間の平均水平風速, 平均風向を示した. 2014 年 10 月 6 日には台風 18 号の通過に伴い, 10 分間平均水平風速 34m/s を記録した. なお, 各観測機器による観測データの差異は小さく, 正常に観測が行われていると判断できる.

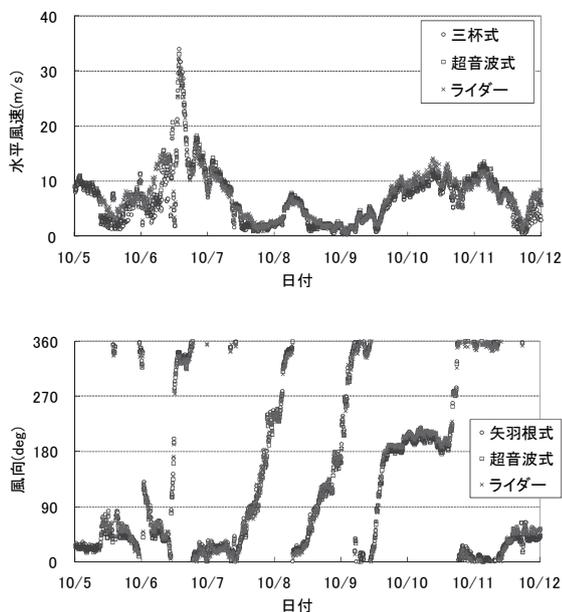


図 8 風向・風速の観測データの一例

(b) 海象観測

海象観測については, ミドルハルに超音波式海象計と流速プロファイラー(ADCP)を設置している. また, 観測データの相互確認のため, 浮体式サブステーションから約 2km 離れた海域(2MW 風車搭載の浮体式洋上風力発電設備近傍)に波浪ブイを設置している.

図 9 には浮体式サブステーションに設置した超音波式海象計と, 浮体式サブステーションから約 2km 離れた海域(2MW 風車搭載の浮体式洋上風力発電設備近傍)に設置した波浪ブイによって観測した有義波高の 10 分間平均値を示した. 超音波式海象計と波浪ブイの観測結果はよく一致している.

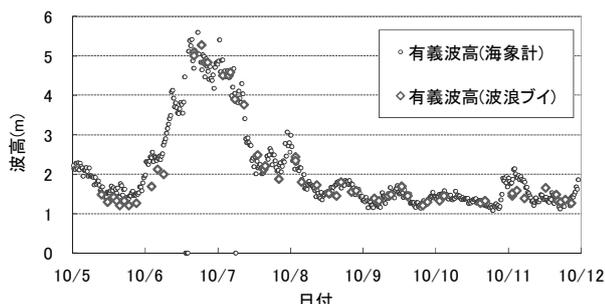


図 9 有義波高の観測データの一例

(c) 浮体動揺の計測

観測された風と波のデータは, 浮体動揺の影響を受けるため, 浮体動揺の影響を高精度に補正する必要がある. 従って, 浮体式サブステーションにはマスト高度 40m, 50m, 60m の 3 高度に 2 軸加速度計, 上部構造中央部(B デッキ)に 3 軸加速度計とジャイロ, 上部構造上面(C デッキ)に 3 台の RTK-GPS とサテライトコンパスを設置し, 浮体動揺を観測している.

浮体動揺の並進 3 成分(サージ, スウェイ, ヒープ)と回転 3 成分(ロール, ピッチ, ヨー)は, 「3 台の GPS から求める方法」と, 「1 台の GPS とジャイロ, サテライトコンパスから求める方法」の 2 種類を用いて求めた. GPS は衛星との通信状況が不安定になると, 観測データが欠損する. 従って, 設置した全ての GPS(3 台)が欠損無く観測できなかった場合に 1 台の GPS とジャイロ, サテライトコンパスから求める方法」を用いることとした.

「3 台の GPS から求める方法」は, 未知数である並進 3 成分と回転 3 成分, 浮体の動揺中心座標(x, y, z)を, 9 つの観測データ(緯度, 経度, 高度×3 台分)を用いて求める方法である. また, 「1 台の GPS とジャイロ, サテライトコンパスから求める方法」は以下の通りである. ロールとピッチはジャイロで観測した角速度を積分して求める. ヨーはサテライトコンパスで観測する(ジャイロで観測されるヨー方向の角速度はドリフトするため). ジャイロとサテライトコンパスから求めた回転 3 成分と, 1 台の GPS の観測データ(緯度, 経度, 高度)から並進 3 成分を求める.

図 10 には, 台風 18 号通過時の 2014 年 10 月 6 日 13:30~13:40(10 分間)の浮体動揺の算出結果を示す. 「3 台の GPS から求める方法」と「1 台の GPS とジャイロ, サテライトコンパスから求める方法」の浮体動揺の算出結果は良く一致しており, 「1 台の GPS とジャイロ, サテライトコンパスから求める方法」が GPS の観測データに欠損があった場合の代替手法として有効であることを確認した.

運転開始から, 1 年が経過した. 当初想定された平均風速 7.1m/s に対して, 実際に観測された平均風速

は 6.6m/s であり、平年の風速よりやや低くなっている。また、設備利用率は想定された 35% に対して、現在までは 27% である。これは風況のよい 2 月と 3 月に風車調整作業に伴い、利用可能率が低下したためであり、今後想定通りの設備利用率が達成できると考えている。

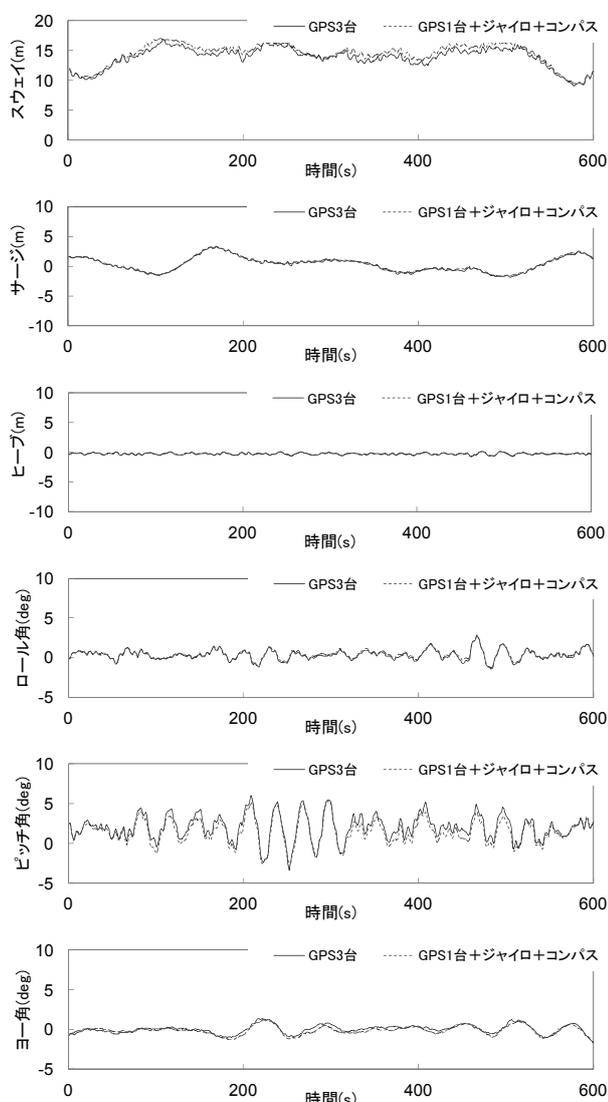


図 10 浮体動揺の計測結果の一例

5. まとめ

2013 年 11 月に福島沖浮体式洋上ウインドファームの第 1 期工事は完了し、発電を開始した。工事中に台風に襲われ、係留索が海中に落下するなどの困難に直面したが、コンソーシアムメンバーの協力により全ての問題を解決し、予定通り第 1 期工事を完成させた。第 1 期工事完了後、約 1 年が経過した。2MW 浮体式洋上風車と世界初のサブステーションともに順調に運転している。またサブステー

ションに設置した観測機器からの気象・海象・浮体動揺などの観測データの収集と解析も開始している。

今年から、第 2 期工事が開始し、世界最大級 7MW の風車を搭載した浮体の建造、設置工事を開始した。本実証研究の進捗状況の詳細については福島洋上風力コンソーシアムホームページ⁴⁾から知ることができる。なお、洋上サブステーション浮体の建造と曳航・設置および 7MW 大型洋上風車用浮体の開発について、本特集を参照されたい。

今回の実証研究を通じて、世界で初めての浮体式洋上ウインドファームのノウハウを蓄積すると共に、福島県が風力発電関連産業の一大集積地となることを目指している。

参考文献

- 1) 石原孟: 浮体式と着床式洋上風力発電の現状と将来展望 ～世界で優位に立つため政府目標の設定と特区創設を～, ビジネスアイ エネコ, No.7, pp.16-19, 2013.
- 2) 今北明彦, 北小路結花: 福島浮体式洋上風力発電施設建設工事, 作業船, No. 315, 4 月号, 2014.
- 3) 堀哲郎, 山下篤, 白枝哲次: 海の上で吊り上げる ―浮体式洋上ウインドファームの建設―, 土木技術, 8 月号, 2014.
- 4) 川東龍則, 山口敦, 石原孟: 福島県沖浮体式洋上ウインドファームの気象・海象・浮体動揺の観測について, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014.
- 5) 福島洋上風力コンソーシアムホームページ: <http://www.fukushima-forward.jp/>

著者紹介

石原孟

- 1962 年生
- 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
- 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士課程修了

