

世界初の浮体式洋上風力ウィンドファームへの挑戦*

The challenge to the world's first floating wind farm

石原 孟** 山口 敦** 滝 滋**

Takeshi ISHIHARA, Atsushi YAMAGUCHI and Shigeru TAKI

1. はじめに

福島洋上風力コンソーシアムは、経済産業省からの委託事業として浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業を推進している¹⁾²⁾。表1にコンソーシアムのメンバーとそれぞれの役割分担を述べる。

本実証研究事業では第1期として、2013年11月に2MW ダウンウィンド型コンパクトセミサブ浮体式洋上風力発電設備1基と、世界初となる25MVA 浮体式洋上サブステーションおよび海底ケーブルの設置を完了した。第2期として2015年度に7MW 浮体式洋上風力発電設備2基を新設する予定である。

本稿ではコンソーシアムを代表して本実証事業の第1期での技術的挑戦と得られた経験について紹介する。

風車・浮体・係留の連成解析モデルを構築し、水槽実験による検証を行った。

2013年4月、2MW 風車搭載コンパクトセミサブ浮体の縮尺模型により水槽実験(図1)を行った。風、波および流れの複合外力に対する動揺特性データを収集すると共に、発電時における最適制御の検証を実施した。



図1. 水槽実験

表1 コンソーシアムメンバーと役割分担

メンバー	主な役割
丸紅株式会社 【プロジェクトインテグレーター】	事前協議・許認可、維持管理、漁業との共存
国立大学法人東京大学 【テクニカルアドバイザー】	観測予測技術、航行安全性、国民との科学・技術対話
三菱商事株式会社	系統連系協議、環境影響評価
三菱重工業株式会社	V字型セミサブ浮体(7MW)
ジャパンマリンユナイテッド株式会社	アドバンストスパー浮体、浮体サブステーション
三井造船株式会社	コンパクトセミサブ浮体(2MW)
新日鐵住金株式会社	高性能鋼材の開発
株式会社日立製作所	洋上変電所の開発
古河電気工業株式会社	大容量ライザーケーブルの開発
清水建設株式会社	海域調査、施工技術
みずほ情報総研株式会社	浮体式洋上風力発電に関する情報基盤整備

サブステーション上には気象・海象観測機器を設置している。観測タワーに設置した風向計、風速計、甲板上のドップラーライダーにより気象データを収集すると共にそれらから収集した風向、風速観測データの比較検証を行った。中間ハル上部に設置した海象計、流速計により海象データを計測する。また、甲板上に加速度計、GPS、ジャイロを設置し、計測した動揺データを用いて気象・海象観測データの補正方法を開発した。

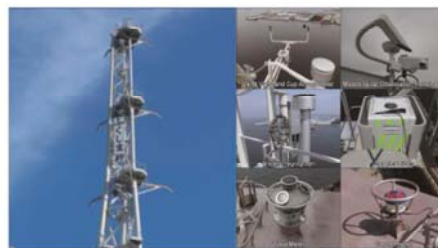


図2. 観測タワーおよび気象・海象観測機器

2. 観測・予測技術の開発

本実証研究において、浮体式サブステーションや2MW 風車搭載コンパクトセミサブ浮体を用いて気象・海象・浮体動揺の計測技術を開発すると共に、

なお、今回の実証研究事業における設計条件は、実施海域の実データがないため、全てシミュレーションにより設定している。従って、実観測データとの比較検証は重要であるため、観測データ項目は、データ欠測や精度向上を考慮して2種類以上の観測機器を用いて収

*平成26年11月27日第36回風力エネルギー利用シンポジウムにて発表

** 会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

集している。サブステーション上の観測機器を図 2、表 2 に示す。

表 2. 気象に関する観測

(a) 気象に関する観測				(b) 海象に関する観測			
項目	形式	数	設置位置	項目	形式	数	設置位置
風速	三杯式風速計	9	マスト上	波高	波浪ブイ	1	約 500m 海域
風向	矢羽根式風向計	10	マスト上	波高・流速	海象計	1	没水ハル上部
風向風速	超音波式風向風速計	9	"	流速	ADCP (流速プロファイラー)	1	没水ハル上部
"	ドップラーライダー	1	上部デッキ	水温	白金温度計	2	没水カラム
視程	現在天気計	1	マスト下	(c) サブステーション浮体動揺に関する計測			
雨量	雨量計	1	上部デッキ	項目	形式	数	設置位置
温度	温度差計	4	マスト上	並進運動	加速度計	1	計測室
気温湿度	気温湿度計	1	マスト下	回転運動	FOG(ジャイロ)	1	計測室
気圧	気圧計	1	計測室	位置	RTK-GPS	3	デッキ上 3 点
日射	全天日射計	1	上部デッキ	方位	GPS 方位計	1	デッキ上

また、2MW 風車搭載コンパクトセミサブ浮体上には、風車・浮体の各種観測機器を設置している。風車運転情報は、ナセル内に設置した SCADA システムにより収集している。風車・浮体の構造ひずみはひずみゲージにより測定している。浮体動揺は、浮体上の GPS やジャイロにより測定している。風車・浮体上の観測機器は図 3、表 3 に示す。



図 3. 風車・浮体上の観測機器

表 3. 風力発電設備(風車)と浮体／係留に関する計測

(a) 風力発電設備(風車)に関する計測				(b) 浮体・係留に関する計測			
項目	形式	数	設置位置	項目	形式	数	設置位置
風車運転	SCADA データ	1	ナセル内	係留張力	抵抗線型ひずみゲージ	12	制鎖構造
ブレードひずみ	ひずみゲージ	4	ブレード基部		光ファイバーひずみゲージ	8	
タワーひずみ(曲げ, おじり)	"	16	2 高度		抵抗線型ひずみゲージ	63	
タワー加速度	サージ加速度計	8	4 高度	構造ひずみ	抵抗線型ひずみゲージ	63	構造部
(c) 浮体動揺に関する計測							
項目	形式	数	設置位置				
並進運動	加速度計	1	センターカラム電気室				
回転運動	FOG(ジャイロ)	1	センターカラム電気室				
位置	RTK-GPS	1	No1 デッキビーム端				
方位	GPS 方位計	1	No3 デッキビーム端				

3. 2MW 風車搭載コンパクトセミサブ浮体

本実証研究の第 1 期では、2MW ダウンウィンド型風車搭載コンパクトセミサブ浮体において、浮体動揺の低減および安全性と発電効率を両立した浮体式風力発電システムの開発を行った³⁾。2MW ダウンウィンド型風車搭載コンパクトセミサブ浮体を図 4 に示す。

コンパクトセミサブ浮体は、中央のセンターカラム、3本のサイドカラム、および 3 本のブレース、甲板デッキビームおよびボンツーンビームから構成され、2MW 風車

を支持している。コンパクトセミサブ浮体は喫水が浅く、建造、曳航に優れており、サイドカラム底部にあるフーティングバラストタンクにより浮体の喫水が制御される特徴を持っている。2MW 風車搭載コンパクトセミサブ浮体の仕様を図 5 に示す。



図 4. 2MW ダウンウィンド型風車搭載コンパクトセミサブ浮体

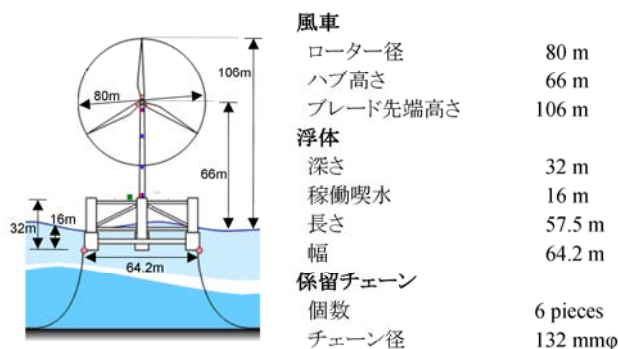


図 5. 2MW 風車搭載コンパクトセミサブ浮体の仕様

コンパクトセミサブ浮体の建造は、三井造船(株)千葉事業所ドックにおいて 2012 年 12 月に開始され、2013 年 5 月に完了した。

2013 年 6 月下旬コンパクトセミサブ浮体に 2MW ダウンウィンド型の洋上風車が搭載された。3 節に分割された 48.5m のタワーを据え付け、ナセルを搭載した後、39m のブレードが取り付けられ直径約 80m の浮体式洋上風車の建方が完了した。

4. サブステーション用アドバンストスパー

アドバンストスパー型浮体³⁾は、安定性と低動揺に優れており、一般のスパー型よりも設置コストが低い。今回アドバンストスパー型サブステーション上には、変電所と気象・海象観測および非常用ヘリポートが設置されている。サブステーションを図 6 に示す。

サブステーションの上部ハル甲板上には、気象観測用タワーおよびヘリポートが取り付けられ、上部ハル内には世界初の浮体式洋上変電設備が設置されている。下部ハルには、コンクリートを充填することにより重心を低くし、垂直状態での建造・曳航を可能にした。またコブ・中間ハル・下部ハルを持つユニークな浮体形状を利用

して、波による浮体動揺を低減している。サブステーションの仕様を図 7 に示す。



図 6. 浮体式サブステーション

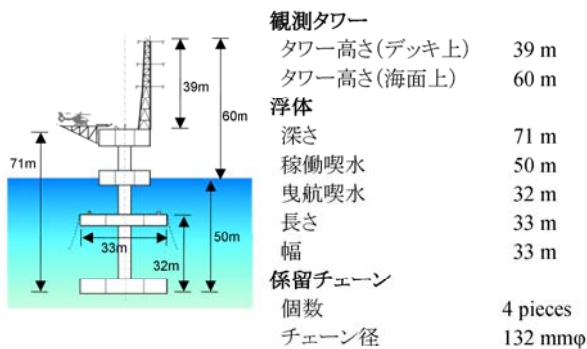


図 7. サブステーションの仕様

サブステーションの建造は、ジャパンマリンユナイテッド(株)神奈川磯子工場ドックにおいて 2012 年 12 月に開始し、2013 年 7 月に完了した。

5. 送変電設備システム

風車によって発電された電気は、世界初の浮体式変電施設であるサブステーションに集電され、22KV から 66KV に昇圧され、海底ケーブルを通じて陸上の系統点まで送電される。

福島沖実証研究実施海域の厳しい気象・海象条件に対応すべき、サブステーションに搭載された変電設備に対して傾き試験および振動試験を実施して、性能評価を行った。試験の様子は、図 8 に示す。

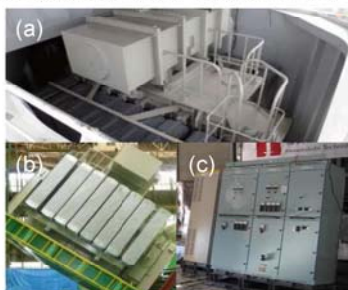


図 8.(a)変電設備 (b)傾き試験 (c)振動試験

対疲労性に優れた遮水構造を持つ大容量ライザーケーブルシステムを開発し、66KV ライザーケーブルの挙動解析シミュレーション(図 9(a)参照)および引留装置強度試験の性能評価を行い、安全性を確認した。

(図 9(b)参照)これらにより厳しい気性・海象条件の中、世界初の浮体式洋上送変電システム技術を確立した。

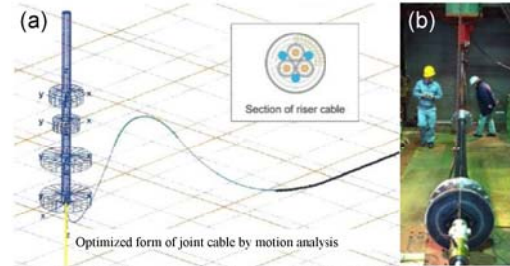


図 9. (a)ライザーケーブルの挙動解析シミュレーション (b)引留装置強度試験

6. 浮体式洋上風力発電設備の施工技術

本実証実験では、事前調査により施工に関わる設計条件の設定を行い、漁場他環境に与える影響を最小化する施工技術を確立した⁴⁾。

2013 年 5 月実証研究実施海域にコンパクトセミサブ浮体およびサブステーションを係留するアンカーおよび係留チェーンの設置を行った。それぞれの設置位置は ROV と呼ばれるロボットで確認すると共に、係留チェーンおよびアンカーは浮体と接続する前に把駐力テストを行った。アンカーと係留チェーンおよびその敷設状況を図 10 に示す。



図 10. (a)アンカー (b)係留チェーン (c)チェーン敷設

2013 年 6 月 27 日、2MW 風車搭載コンパクトセミサブ浮体は、三井造船(株)千葉事業所ドックを出渠し、3 日間の曳航の後福島県小名浜に到着した。曳航は図 12 のように親タグボートと 3 隻の補助タグボートにより行った。小名浜港にて試運転調整後、実証研究実施海域に曳航し、係留した。コンパクトセミサブの曳航の様子は図 11 に示す。



図 11. 2MW 風車搭載コンパクトセミサブの曳航

コンパクトセミサブの係留チェーンを接続する際に、

係留索を引き込むためのロープ(メッセンジャー)が切れ、係留索が海底に落ちてしまうなどの困難に直面したが、作業船を使って引き上げ、係留索を接続することに成功した。このような事態を防ぐために、第2期工事ではフローティングクレーンを使わずに係留索を接続する施工方法を使用することとした。

2013年7月11日、アドバンストスパー型サブステーションがジャパンマリンユナイテッド(株)神奈川磯子工場ドックから、進水喫水である下部ハル上の位置においてフローティングクレーンを使用して出渠し、その後1隻の主タグボートと3隻の補助タグボートにより曳航喫水である中間ハル上の位置で、直接実証研究実施海域まで曳航した。10月に係留作業が完了して稼働喫水であるコブの位置まで沈下させた。サブステーションの曳航を図12に示す。



図12. サブステーションの曳航

サブステーションの設置作業中には、東日本と北日本を縦断した台風1318号や、伊豆大島に甚大な被害をもたらした台風1326号などが福島沖に襲来したが、台風接近のたびに作業中の喫水(32m)を稼働喫水(50m)まで沈下させるなどの対策を行い、無事に設置を完了させることに成功した。



図13. 海底ケーブルの敷設

2013年6月上旬、陸上変電所のある広野海岸にて66KV海底ケーブル敷設工事を開始し、2013年7月完了した。次に、世界初の66KVライザーケーブルのサブステーションへのつなぎ込みを行い、2013年9月に22KVライザーケーブルと2MW風車の接続を完了した。これらの接続工事は全て専用船で行われ、ROVなどの所定の検査の後、送変電設備は2013年10月に完了

した。広野海岸における海底ケーブルの敷設状況を図13に示す。

7. 浮体式風力発電所の運転実績

福島沖浮体式風力発電所は2013年11月に運転開始して以来、1年近くの運転を行ってきた。当初想定された平均風速7.1m/sに対し、実際の平均風速は7.0m/sであり、想定通りの風が吹いている。また、この風況のもとで当初想定された設備利用率は35%であったが、現在までの設備利用率は28%であった。これは、風況のよい2月～3月に風車を調整するための作業を行っており、利用可能率が低かったためであり、今後想定通りの設備利用率が達成できると考えられる。

8. 結論

2013年11月福島浮体式洋上ウインドファーム第1期工事は完了し発電を開始した。第1期工事の成果は以下の通りである。

- 1) 2MW風車搭載コンパクトセミサブやサブステーションに設置した観測機器からの気象・海象データを収集すると共に、解析を開始した。
- 2) 工事中に例年にない数の台風に襲われたり、係留索が海中に落ちてしまうなどの困難な事態に直面した、全ての技術的問題を解決し、予定通り、第1期工事を完了した。また、第2期工事ではフローティングクレーンを利用した係留索の接続を行わないなど、第1期工事で得た技術的知見は第2期工事に反映されている。
- 3) 第1期工事の完了後、約1年が経過したが、2MW風車搭載コンパクトセミサブも、世界初のサブステーションも順調に運転している。

謝辞

本研究は、経済産業省の受託業務で得られた研究成果である。ここに関係者の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 福島洋上風力コンソーシアムホームページ,
<http://www.fukushima-forward.jp/>
- 2) 石原孟: 福島沖浮体式洋上ウインドファームの実証研究, 土木学会 平成26年度全国大会 研究討論会, 2014.
- 3) 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.
- 4) 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.