

日本の海域に調和する洋上風車浮体の開発 —V字型セミサブ浮体の設計及び工法の妥当性評価—

Development of Offshore Wind Turbine Floater that Blends into Japanese Waters
- Evaluation of the Validity for Design and Construction method of
V-shaped Semi-submersible Floating Structure -



小松 正夫*¹
Masao Komatsu

熊本 均*²
Hitoshi Kumamoto

太田 真*³
Makoto Ohta

田中 大士*⁴
Hiroshi Tanaka

森 英男*⁵
Hideo Mori

宮崎 智*⁶
Satoshi Miyazaki

当社が参画している“福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業”において、当社が開発した 7MW 浮体式洋上風車の福島沖への設置が完了し、実証運転の段階へと進んでいる。本稿では、V字型セミサブ浮体の設計及び採用した工法について、実際の建造から設置までの作業を振り返って妥当性を検証し、そこから得られた知見及び別途実施中の社内の研究成果から今後の事業化に関する考察を行った。検証の結果、V字型セミサブ浮体は目論見通りの性能、工作性、作業性を有しており、経済性に優れていることが確認されたが、将来的な量産や事業化を検討するにあたっては、設計の改善と共に係留方式や施工要領の見直し等、総合的なコスト低減の余地があることも明らかになった。

1. はじめに

浮体式洋上風車の浮体形式としては、一般の海洋構造物と同様、大きくはセミサブ形式、TLP (Tension Leg Platform) 形式、SPAR 形式に分類される。

TLP 形式も SPAR 形式も広義にはセミサブ (半没水) 形式だが、一般的なセミサブ形式は水面貫通部が多柱構造の浮体をカテナリー係留するのに対し、TLP 形式は強制浮力によって係留系を海底に緊張係留する形式であり、SPAR 形式は浮体の水面貫通部を1本の柱体とすることでより波の影響を受けにくいとされる。

ただし、TLP は係留する海底地盤に強固な基礎杭を形成する必要がありコスト的には他の形式に比べ高い。また SPAR 形式は構造がシンプルなために他の形式に比べ建造コストを低く抑えることができる可能性があるが、構造上喫水が深くなるため、建造や組立場所が制限される。

以上を勘案し、当社では“福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業”での 7MW 風車搭載浮体としてV字型セミサブ形式を採用した⁽¹⁾。その後、当社長崎造船所で浮体を建造し、福島県の小名浜港にて風車を搭載、2015 年8月に福島沖の所定位置に設置を完了している。

本稿では建造から設置までの作業を振り返り、V字型セミサブ浮体の設計及び採用した工法が妥当なものであったか評価を行い、実証研究事業を通じて得られた知見及び別途社内で実施中の研究成果から今後の浮体式洋上風車の事業化に関する考察を行う。

*1 交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部 船海エンジニアリング部 グループ長

*2 交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部 船海エンジニアリング部

*3 総合研究所 流体研究部 主席研究員

*4 交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部 長崎技術部

*5 交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部 船海エンジニアリング部 主席技師

*6 交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部 長崎技術部 主席技師

2. 設計及び工法の妥当性評価

図1に当社長崎造船所 香焼(こうやぎ)ドックでのV字型セミサブ浮体の建造風景を示す。

V字型セミサブ浮体は長さ 106m、幅 14m、深さ 7m の直方体(ロワーハル)をL字型に配置し、各端部に長さ／幅夫々14m、高さ 25m の直方体(コラム)を配置する構造とした。これは建造コスト低減や各種工事の施工性向上及び大型風車用浮体としての運動・係留性能確保を狙ったものである。



図1 当社長崎造船所 香焼ドックでの建造風景

設計・建造から設置までの全体工程を通して、設計及び工法の妥当性を以下のとおり確認した。

2.1 浮体構造

(1) シンプルな構造

本浮体は通常のセミサブ構造物で見られる斜材を廃止し、直線ボックス構造とした。この直線ボックス構造は斜材の接合や曲面の施工といった難度の高い作業が不要であり、建造コストの低減が図れるとともに、工作精度の向上による構造の信頼性向上にも寄与した。容易に建造可能であることは建造要領の自由度を高めることにもつながることから、本浮体は量産にも適した形状／構造様式であると言える。

(2) 自己安定型の浮体

ロワーハルで浮力を得ることにより、進水・曳航・着底・設置の各ステージにおいて浮体は自立し安定した。浮力補助等の特殊な考慮が不要であったため、施工の自由度が向上し、安定性に関するリスクや付随する作業を排除することができた。

(3) 浅喫水の実現

本浮体はロワーハルに大きな浮力を持たせて内部をバラストタンクにすることで、作業ステージに応じて適切な喫水に調整することが可能となった。風車を搭載しない状態では喫水を約 3.5m まで浅くすることが可能であり、長崎港内／小名浜港内における入出港作業及び小名浜港内での着底作業が容易であった。これにより、港内の平穏な環境で種々準備工事が可能となり、海象条件に起因する工事効率の低下を防止することができた。将来発生する大型部品の交換や浮体の撤去といったイベントに対応する上でも、有効な特徴であると考えられる。

(4) 上記要素の組み合わせ

直線ボックス構造かつ浅喫水であることを利用し、浮体を岸壁に近接して着底させることにより浮体の動揺を防止して、風車搭載工事においてはクレーンのリーチ低減を図る事ができた。これは世界最大級の風車搭載作業の効率化とその品質向上に有効であった。

2.2 工事方法

(1) 曳航工事

本浮体の曳航時排水量は 10000 トン程度であるが、V字型にしたことで見かけの幅(約 150m)及び長さ(約 85m)がかなり大きい。このような幅広構造物を曳航するにあたり、水槽試験及び数値計算によって最適な曳航方向及び曳航抵抗等の検討を実施し、曳航業者や保険の検査機関との綿密な事前検証も実施して曳航要領を策定した。結果として、長崎から小名浜への曳航作業では台風による避航があったものの、曳航自体は問題なく実施され、幅広構造物の安定した曳航を実証することができた。図2に長崎から小名浜への外洋曳航時のタグボート配置を、また図3に主曳航船から撮影した曳航時の浮体状況を示す。



図2 長崎から小名浜への外洋曳航時のタグボート配置



図3 長崎から小名浜への外洋曳航時の浮体状況

(2) 着底工事

① 着底マウンド高さ

着底マウンド高さの計画に当たっては、小名浜港藤原埠頭先端護岸の水深、潮汐を考慮し、着底後にはローワーハル上面が海水面下に没水して、上部を波が透過するように配慮した。これにより着底時の波浪変動圧力の低減が可能となり、着底作業及びその後の安定した短期着底に有効であった。着底作業は天候に恵まれたこともあり、必要着底精度 $\pm 1\text{m}$ に対して平面の最大ずれ量が 0.26mという精度で着底させることができた。図4に着底後の浮体の状況を示す。



図4 小名浜港での浮体の着底状況

② 着底マウンドへのプレロード^(注1)

着底マウンドへのプレロードは行わなかったため、風車搭載による重量変化の影響を確認する目的で、着底後にマウンドの沈下量を適宜計測した。図5に小名浜港での風車の搭載状況を、また図6に着底後の浮体沈下量の推移を示す。結果として沈下は微小であり、マウンドへのプレロード等の対策を省いても問題無かった事が確認された。

(注1) 軟弱地盤に盛土などで荷重をかけて沈下を促進させる工法



図5 小名浜港での風車搭載状況

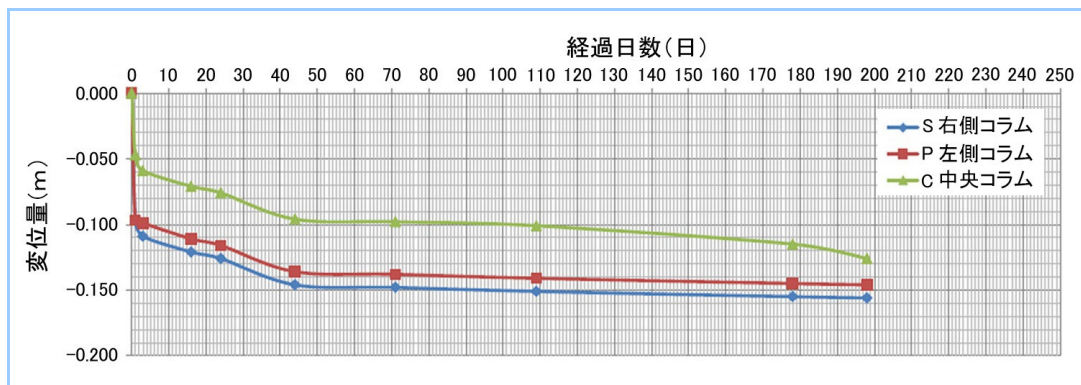


図6 風車搭載に伴う着底後の浮体沈下量の推移

③ アスファルトマット敷設

着底時の摩擦抵抗増加と接地面塗装保護を図るため、マウンドと浮体の間に厚さ 8cm のアスファルトマットを敷いた。アスファルトマットの敷設に関しては、事前検証で浮体への付着が懸念され、再浮上時に付着が確認された時の対策も準備していたが、結果としてはアスファルトマットの浮体への付着は認められず、施工の容易性を含めて、アスファルトマットの有効性を確認することができた。

(3) 係留設置工事

図7に風車の搭載及び係留工事の諸準備を完了し、係留場所に曳航される浮体の状況を示す。係留工事では計画通りに係留ラインへ張力を与えなければならないが、従来の初期張力を管理する方法では浮体に接触した海上クレーンを使用してチェーンを吊上げる作業が避けられない。福島沖のように潮流や風で浮体が浮遊し、また外洋の高い波による動揺が大きい環境では海上クレーンを使用した張力の管理は難しく、クレーンフックの振れ回りによる作業者の安全に関しても多大な注意を払う必要がある。当社のV字型セミサブ浮体の工事では、船級協会と協議の上、初期張力を管理する方法ではなくチェーンリンク数(チェーン長さ)を管理する方法を採用した。さらに施工方法として海上クレーンによりチェーンを吊上げるのではなく、浮体上に設置したチェーンリフター(ウインチ)によりチェーンを巻き上げる方法を採用した。

係留計画を策定するにあたり、最終的なアンカー位置における係留初期張力をパラメーターとした検討を実施し、設定した初期張力が得られるチェーンリンク数(チェーン長さ)を決定した。実際の工事では計画通りのリンク数で問題無く係留固定することができ、作業環境の安全性についても現場の作業員から高い評価を受けた。この工法は施工時の潮流・潮汐・波浪等々による誤差を排除する工法でもあり、係留施工の管理精度も高めることができた。図8に福島沖での係留工事の状況を示す。



図7 風車搭載後に係留場所へ曳航される浮体



図8 福島沖での係留工事の状況

2.3 浮体性能

(1) 係留システム

係留チェーンフェアリーダー^(注2)近傍の係留索に設置した傾斜計により計測した絶対傾斜から係留力に換算した結果を図9に示す。観測開始以降の低気圧通過による荒天時に計測された最大係留力と気象海象データに基づく解析計算は概ね良好に一致していることから、係留システム設計手法の妥当性を確認することができた。

(注2) 係留チェーンをアンカー方向にガイドする金物

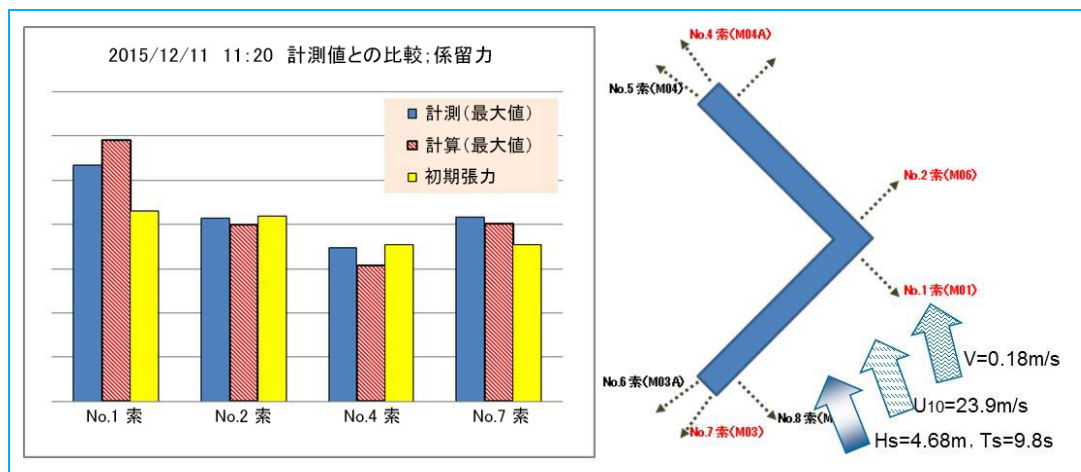


図9 係留力 計測値と計算値の比較

(2) 浮体の運動性能

係留システムと同様に浮体運動の中でも重要となる横揺れ(Roll)と縦揺れ(Pitch)についても計測結果と解析結果を比較したところ、Rollは僅かに過小評価、Pitchは設計上安全側となっている(図10)。両者は概ね良好に一致しており、浮体の運動性能についても設計手法が妥当であったことが確認された。

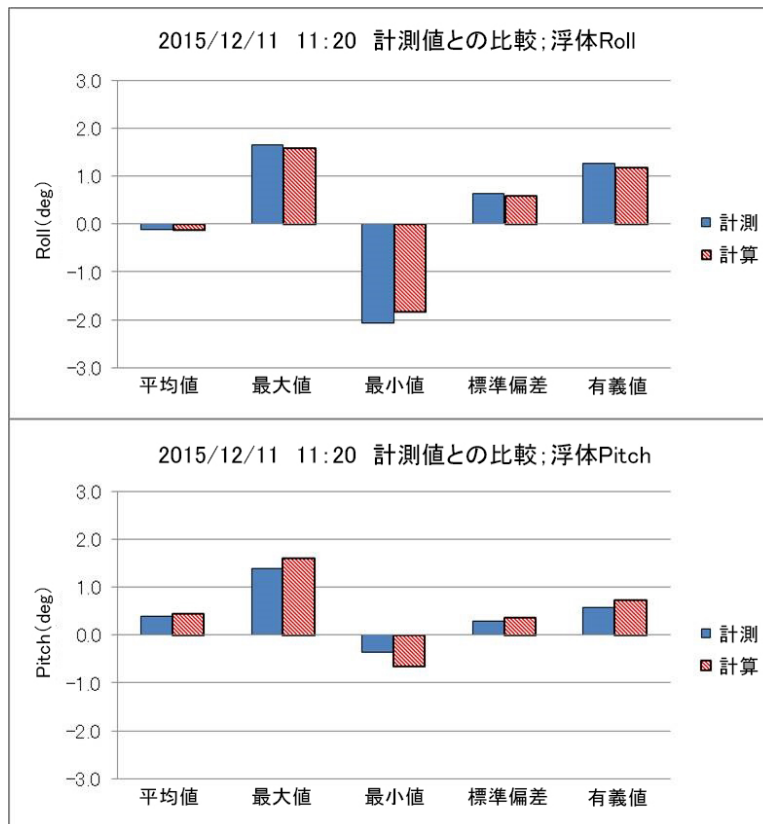


図10 浮体運動 計測値と計算値の比較

(3) 構造設計時の設定荷重

本浮体のローハル構造とコラム構造の代表箇所に変形ゲージを貼り付け、計測した変形データを応力に換算し、レインフロー解析により長期頻度分布を作成した。長期確率相当に外挿した結果とローハルの縦曲げ応力解析結果との比較を実施したところ、ほぼ同等の結果が得られており、構造設計用に設定した荷重が妥当であったことが確認できた(図11)。また、計測結果からは波浪の方位毎の発生頻度が応力に与える影響も見ることができる。

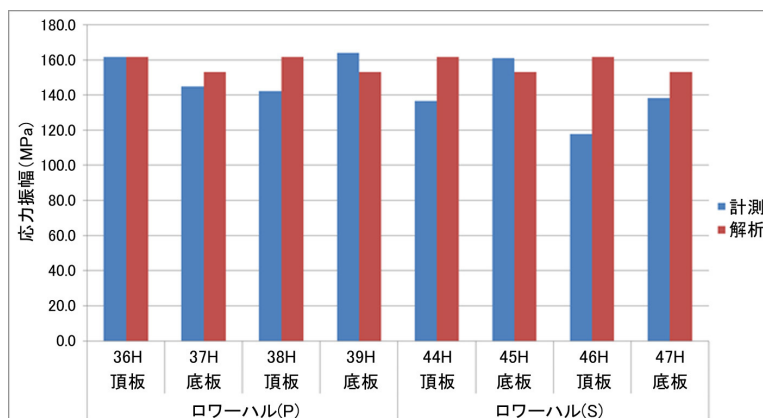


図11 ローハル設計縦曲げ応力 計測値と計算値の比較

3. 経済性の評価

浮体式洋上風車の経済性評価に関しては、浮体式風車の設備費用のみならず、運転管理・保守点検や売電収入を含めたエネルギーコストとしての評価が必要となるが、ここでは浮体式風車の設備費用の中の、浮体及び係留システムに関わる経済性についてのみ言及する。

3.1 建造コスト

2.1 に記載の通り、V字型セミサブ浮体は通常のセミサブ構造物で見られる斜材を廃止し、直線ボックス構造とすることで、部材加工の単純化、溶接等作業の効率化を図り加工単価を低減した。量産時には建造場所の自由度が増すことも期待できる。

3.2 曳航、風車搭載工事コスト

風車の搭載や係留準備工事は平穏な港内に浮体を引き入れ着底させ実施した。着底マウンド造成等の付帯工事は発生したが、2.1 に記載した浮体構造の特徴により、喫水制限のある港内を浚渫することなく、インフラ整備に要するコストを低く抑えることができた。

3.3 係留作業コスト

本浮体の係留ラインは、係留に関わる制約と運動性能から、8本としたが、これは他の浮体式洋上風車と比べて多い。係留ライン数は工事費に直接かわるため低減することが望ましいが、係留システムの改善及び係留工事の方法によって係留工事費を大幅に低減できる可能性もあり、場合によっては係留本数が全体に与えるコストインパクトは小さくなる。本浮体では2章に記載の通り工法を改善することで全体のコスト低減を図っており、結果として大きなコスト増とはならなかった。将来的に量産することを考える場合は、工事全体を見て有効な方策を総合的に判断する必要がある。

4. 事業化に関する考察

引き続き実証試験で確認すべき項目はあるが、これまでの実証試験で得られた成果や知見及び別途社内で実施中の研究成果を基に、事業化に関する簡単な考察を行った。

4.1 浮体設計

実証試験の経験から、浮体設計へフィードバックすることで全体のコスト低減に寄与すると考えられるアイデアが得られた。例を挙げると、セミサブ状態で浮体を曳航・保持する為の各コラムの曳航点の確保、浮体からの突起物を最小とする為の外部電源防食装置の採用、浮体へのアクセス率及び安全性向上のための交通装置の改善等である。これらの改善の中には設計に織り込んでおけばコストアップを生じない、あるいはわずかなコストアップで実施可能な項目もあり、事業化の検討に際しては総合的な経済性評価を実施して採否を検討する必要がある。

4.2 浮体寸法

浮体の小型化により材料費や建造費、曳航・係留作業費の低減が見込まれるが、風車の運動・加速度許容量、係留力等との関連を十分に精査する必要がある。今回の実証試験を通じて検討に有益な情報が得られており、浮体の小型化は十分に実現可能と考えられる。また、設計思想の転換が可能となれば、浮体の小型化は格段に進むであろうことが確認された。

4.3 係留方式

(1) 係留方式の改善

係留方式に関しては施工性と密接な関連があり、施工要領との並行検討が必須である。実証試験の成果として大型アンカーとアンカーチェーンによる施工法は確立できたが、事業化の際には更なるコストダウンが必要である。上記実証試験の経験からコスト低減に大きな効果を発揮すると考えられる係留方式の改善アイデアが得られており、別途社内で実施中の研究では、中間ウェイトを使用した係留方式がコスト低減に有効であることを確認できている。

(2) 浮体撤去／大型部品交換作業への配慮

浮体本体に関しては、港内で大型部品交換作業を実施できるよう喫水や形状への配慮がな

されているが、陸上風車においてはクレーンを使用せずにブレードを交換する工法のコンセプトがメンテナンス業者から発表される等、技術の進展があり、将来的には洋上風車においても洋上での大型部品交換作業が可能になる等、技術環境が変化する可能性も高い。どのような撤去／大型部品交換方法を採用するかによって採用すべき係留方式が変わるため、事業化に際しては技術動向の見極めを含めて十分な事前検討が必要である。

当面は洋上での大型部品交換作業は実施困難であると予想されることから、係留解除を前提とした係留システムの採用が有効と考えられる。その際は特殊な装置を採用することもあり、その施工を含めた作業全体でコスト評価を実施することが必須である。

(3) 施工方法との調和

先に記載したように、係留方式と施工性には密接な関連があり、係留方式と施工要領の並行検討が必須である。例えば、単一作業船による曳航から係留までの一貫作業が可能となれば、工事工程の自由度やコストの面で有効であるが、その実現の為には浮体供給者と係留工事施工業者に加えて作業船舶運航者との協議が重要となる。7MW 風車搭載浮体の施工では関係者が参集した係留ワーキングチームで全体最適となるように検討が行われ、コスト低減や作業安全性の向上に貢献したことが実証されており、事業化においても関係する専門家がチームを組んで作業全体の最適化を図る必要がある。

4.4 全体システム

(1) 建造要領

実証試験では、長崎で浮体を建造して小名浜まで曳航し、そこで風車を搭載したが、設置場所近傍で浮体建造が可能であれば曳航費用を低減することが可能となる。また海象に左右される曳航期間が短くなれば、計画的な工事が可能になり、工期短縮だけでなくコスト削減が期待できる。さらに建造のみを考慮すれば造船所での建造が合理的だが、設置工事や運転、メンテナンス等も考慮すると、事業場所周辺地域との関連が深い作業も多いことから、事業化においては事業場所近傍での建造も可能な建造要領やそれに適した構造様式を検討しておくことにより、実質的なコスト低減につなげられる可能性もある。

(2) 大型風車の採用

着床式ウィンドファームを構成する場合、一般に1基当たりの単機容量を上げて設置基数を減らすことが基礎のコストや施工費の低減に有効であると言われている。浮体式ウィンドファームでも同様の傾向となることを確認する為、2.4MW 風車搭載浮体の概略設計を実施して使用鋼材重量を比較したところ、2.4MW 風車搭載浮体で使用する鋼材重量は7MW 風車搭載浮体の使用鋼材重量の約60%となった。単位鋼材重量あたりの出力で比較した場合、2.4MW 風車搭載浮体の試算結果と比べて7MW 風車搭載浮体の方が大きくなることから、浮体式ウィンドファームにおいても単機容量を上げた大型風車搭載浮体が有効であると言える。

今回の浮体は7MW 用として設計したが、風車要目等から単純に推算すると現在市場で商用機として提供されている最大の風車(8MW 機)の搭載も可能である事が示唆されており、単位鋼材重量あたりの出力を指標とすれば、この浮体を8MW 機搭載用浮体としてより高く評価する事ができる。搭載風車選定にあたっては風車価格以外にも種々の条件があり、単純に出力の大きいものが有利と言えない場合もあるが、上述の通り浮体としては大型風車搭載が有利であり、また係留システムや施工費等の設置基数に依存するコストが多い為、大型風車の採用による事業化の検討はエネルギーコストの低減に有効であると考えられる。

(3) 設置機材の整備

浮体式洋上風車では、係留システムの敷設と浮体の曳航・係留作業、及び風車の搭載作業が行われるが、これらを効率よく安全に実施するためには、工事機材の充実が必要である。欧米諸国に続き日本国内でも着床式風車の事業化が進みつつあり、将来的には着床式風車の工事用としてジャッキアップ船が整備されることが期待される。また、他の海洋産業用として最

新鋭の大型 AHTS (アンカーハンドリング・タグサプライ船) の建造も進んでいることから、これらの機材を浮体式洋上風車の設置に活用できる環境となれば、稼働率向上による備船価格の低下や工事の効率化により工事コストが更に低減する可能性がある。

5. まとめ

本稿では、福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業における 7MW 浮体式洋上風車の建造から設置までの作業を振り返り、弊社が設計／建造した浮体が目論見通りの性能、工작성、作業性を有しており、経済性に優れていることを確認した。また、実証研究事業を通じて得られた知見及び別途社内では実施中の研究成果から、将来的な量産や事業化を検討するにあたっての設計改善案、係留方式や施工要領の見直しについて考察し、総合的なコスト低減の余地があることを示した。

福島復興・浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業は丸紅(株)(プロジェクトインテグレーター)、東京大学(テクニカルアドバイザー)を中心にコンソーシアムを形成して推進されており、7MW 浮体式洋上風車の曳航及び設置工事が完遂したのは、清水建設(株)、新日鉄住金エンジニアリング(株)をはじめとする工事関係者の尽力によるものである。コンソーシアムメンバーの方々に、心より感謝いたします。

参考文献

- (1) 小松正夫ほか, 日本の海域に調和する洋上風車浮体の開発, 三菱重工技報 Vol.50 No.2 (2013)
- (2) <http://www.statoil.com/en/technologyinnovation/newenergy/pages/default.aspx>
- (3) <http://www.bluegroup.com/product/phase-1.php>
- (4) <http://www.principlepowerinc.com/products/windfloat.html>
- (5) <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13288>
- (6) 片山正敏ほか, 半潜水式海洋構造物の波浪中構造応答解析, 三菱重工技報, 第 13 巻第4号 (1976)
- (7) Larsen T., Hanson T., A method to avoid negative damped low frequent tower vibrations for a floating, pitch controlled wind turbine, The science of making torque from wind. Journal of Physics: Conference Series 75 (2007)
- (8) 松浦正己ほか, 浮体動揺低減に関する新技術, 三菱重工技報 Vol.38 No.3 (2001)
- (9) http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000017.html
- (10) 永井紀彦, 全国港湾海洋波浪観測 30 か年統計 (NOWPHAS1970-1999), 港湾空港技術研究所資料 No.1035 (2002)
- (11) http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/001_07_01.pdf
- (12) 福島復興 浮体式洋上ウィンドファーム 実証研究事業パンフレット 福島洋上風力コンソーシアム版