

7MW 洋上風車浮体の技術 V字型セミサブ浮体の開発

正会員 小 松 正 夫* 正会員 森 英 男**
正会員 宮 崎 智* 正会員 太 田 真**
正会員 田 中 大 士*** 正会員 刈 込 界**

1. はじめに

浮体式洋上風車は国内外において数多くの実証試験が実施され、商業フェーズへ移行しつつある^{1)~4)}。浮体式洋上風車の実用化に際してはCOE（Cost of Energy：発電単価）低減のための単機容量の大型化が必須と言われている。大型風車の採用に当たっては様々な制約があり、その浮体開発は性能のみでなく、建造や設置等あらゆる面でノウハウを結集して取り組む必要がある。台風が頻繁に襲来する日本の洋上という過酷な環境に浮かび、安全に稼働できる大型風車を搭載する浮体構造物を提供するためには、O&M（Operation & Maintenance：運用および保守点検）を含めたコストを勘案し、環境に合致した浮体と風車のバランス、建造容易性、風車搭載設置の要領、洋上設置工法等に加え将来を見据えた連続建造方法を総合的に考慮しなければならない。

本稿では、「福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」において当社が建造したV字型セミサブ浮体の事例について紹介する。

2. 大型浮体式風車のコンセプト

7MW 浮体式洋上風力発電設備『ふくしま新風』の外観を図1に示す。この風車を支える浮体として、以下の条件を設定した^{5)~7)}。これらの条件は種々の面で複合している。

- (1) 自己安定型の浮体
- (2) 日本の港湾域で建造可能
- (3) 建造場所が限定されないこと
- (4) 量産に適した形状・構造
- (5) 風車搭載の効率化
- (6) 重大故障・メンテナンスへの配慮
- (7) 7MW 風車搭載が可能な係留・運動性能

上記条件より、長年にわたる研究開発の成果として、当社では洋上風車の基礎となる浮体としてV



図1 7MW 浮体式洋上風力発電設備

字型セミサブ浮体を選定した。V字状に配置された2辺のローハルの浮力によって建造中は浮上させ、稼働時には注水して没水させセミサブ状態となる。ローハルの交叉部及び端部は3本のコラムと接続した形状をなし、センターコラム上に大型風車を搭載した。ローハル/コラムは曲面のない箱型構造とし、極めてシンプルな構造を採用している。

2.1 浮体の喫水

本浮体および風車の主要目を図2に示す。浮体の建造場所として日本の港湾域に面した既存の設備を利用する場合、その建造中の喫水は浅くしておくことが望ましい。本浮体ではローハル内部のバラストタンクへの注排水により、建造時に浅喫水とすることが可能となった。また、曳航の際にもローハル喫水（3~5m）とセミサブ稼働時喫水（17m）の両方で調整可能であり、海象・状況に応じて曳航喫水を変更することができる。建造中のみならず、重大故障時の対応や将来の撤去の際にサイト近隣の港湾域への入港が必要な場合も考えられるため、国内における浮体式風車では、建造喫水の考慮は重要と言える。

2.2 量産化と建造場所

先に述べたように、本浮体は単純形状の組み合わせを採用していることから、建造コストの低減が可能になるとともに、量産化においても浮体建造時の自由度が増大した。通常、大型鋼構造物は造船所の

* 三菱造船(株) マリンエンジニアリングセンター
** 三菱重工業(株) 総合研究所
*** (株)MILNGカンパニー

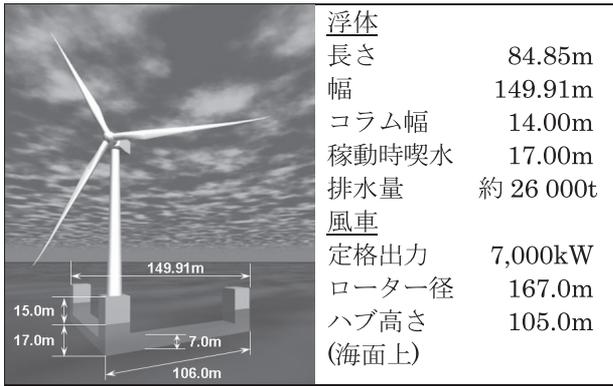


図2 浮体および風車主要目

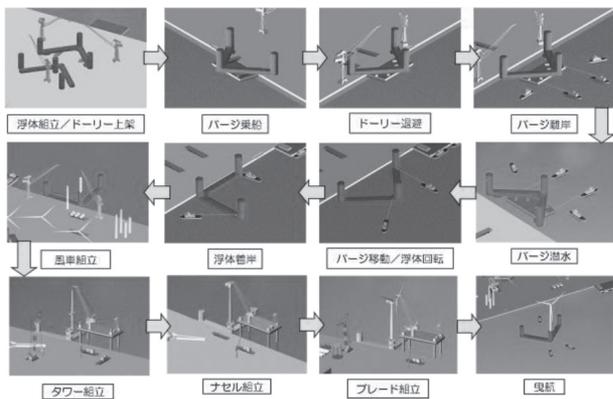


図3 造船所以外での建造要領の一例

ドック等で建造されることが多いが、建造場所から設置場所への曳航費や建造後のメンテナンスを考慮すると、設置場所近隣での建造が望まれる可能性もある。図3はドック設備を使用しない場合の進水浮上、風車組み立て要領のアイデアであるが、ケーソンの製作等でも採用されている手法であり、箱型形状の組み合わせであれば、このような建造要領も量産化の際には検討の対象となり得る。

風車は浮体外側に配置されたセンターコラム上に搭載されている。これにより風車搭載時、浮体の風車搭載位置のすぐ横に搭載用のクレーン等を横付けすることが可能で、クレーンリーチを大幅に減少できる。

3. V字型セミサブ浮体の性能

一般に、浮体設計における静的安定性能と波浪中動揺性能の重要性は知られているが、浮体式風車の設計における性能要件として最重要な項目の一つに風車制御系と連動した動的安定性がある^{8)~10)}。本性能要件は、風車出力／推力の平滑化のための風車翼制御に起因する力が浮体回転運動に負減衰として

作用するために、浮体回転運動を増幅させるかどうかの評価になる。本浮体は、これら三大性能をすべて満足するよう設計初期段階において詳細検討を実施し、十分な性能を有していることを確認している。以下では、船級規則で規定される静的安定性能以外の波浪中運動性能と風車制御系と連動した動的安定性、更に係留性能について概説する。

3.1 浮体の波浪中運動性能

2015年8月設置以降最大となる有義波高9.92mを観測した2016年の台風10号通過時の横揺れ(Roll)と縦揺れ(Pitch)の計測結果を計算結果と比較して図4に示す。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設計手法が妥当であったことが確認された。また、有義波高が10m近い大波高時における最大傾斜が3degを下回ったことから、風車を搭載する上での仕様を満足した運動性能に優れた浮体であることが確認できた。

一方、ハブ高さにおける風車の推力が最大となる7MW定格発電時のRollとPitchについては、両者の比較を図5に示す通り、最大傾斜は0.8degを下

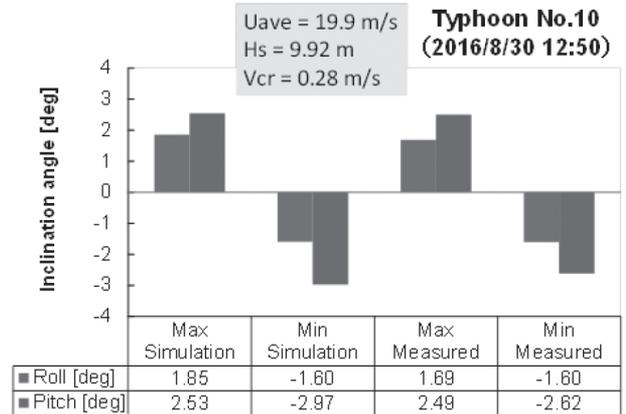


図4 暴風時の運動計測値と計算値の比較

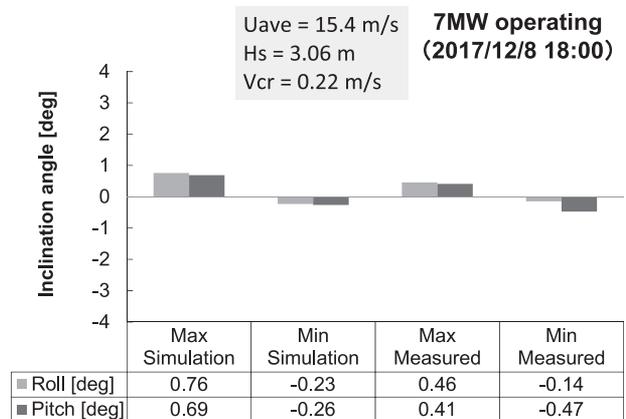


図5 発電時の運動計測値と計算値の比較

回っており、運動性能と安定性能に優れた浮体であることがわかる。

なお、後述の新設ストラットによる運動への影響については軽微であることを確認している。

3.2 風車制御系と連動した動的安定性能

ネガティブダンピングとは、風車出力の平滑化のための風車翼制御に起因するスラスト力が浮体回転運動に負減衰として作用するために、浮体回転運動を増幅させる浮体式風車固有の問題であり、発生確認及び発生する場合には抑制するための翼制御設計が重要となる。本試験を実施する上で不可欠な要件は次の通りである。

- ・翼ピッチ角を動作させる機構を持たせること
- ・負荷トルクを調整可能な発電機を有すること
- ・実機と相似な制御速度を有すること
- ・実機と相似な重量で模型を製作すること

そこで、以上を勘案し実機と同等なスラスト力を得る翼を再設計した上で、実機と同様な可変速翼ピッチ制御を実現する風車模型を製作した。三菱重工業(株)大型境界層風洞（長さ 30m × 幅 6.0m × 高さ 5.0m）では、風洞内に簡易水槽（長さ 4.5m × 幅 4.5m × 深さ 2.2m）や簡易造波機を設置して、ネガティブダンピングに関する試験を実施した。

本風洞試験では、二種類の浮体を対象に実施している。まず最初に、事前の数値解析による評価においてネガティブダンピング発生が確認された形式の浮体上に本風車模型を搭載し、従来の翼ピッチ制御状態で定格風速を少し越える風速（約 1.8m/s）を発生させて行った。この時の計測波形を図 7 に示す。計測開始後、浮体 Pitch の振幅が徐々に増大し、ネガティブダンピング発生の様子を再現できた。

次に、V 字型セミサブ浮体に本風車模型を搭載したケースでは浮体の減衰力が風車制御系の負減衰を上回り、ネガティブダンピングは発生しなかった。そこで、自由動揺試験のように予め約 10deg の初期傾斜を与えた状態から開放する試験を行った。この時の波形を図 8 に示すが、傾斜は徐々に小さくなり従来の翼ピッチ制御のままで浮体動揺は問題ないことを確認した。なお、両浮体の排水量はほぼ同等であり、ネガティブダンピングを発生させないための動揺低減制御の有効性についても実験的に確認している。

3.3 浮体の係留性能

前述の運動性能と同様にして、設置後最大となる平均風速 33.3m/s を観測した 2016 年台風 9 号及び有義波高 9.92m を観測した 2016 年台風 10 号通過



図 6 風洞試験状況

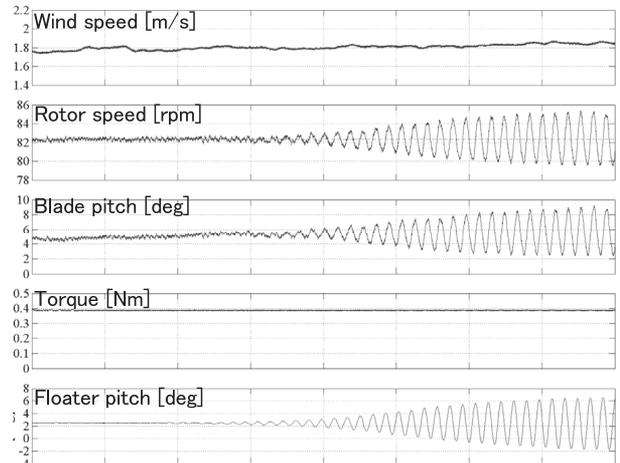


図 7 ネガティブダンピングが発生した浮体の応答時系列

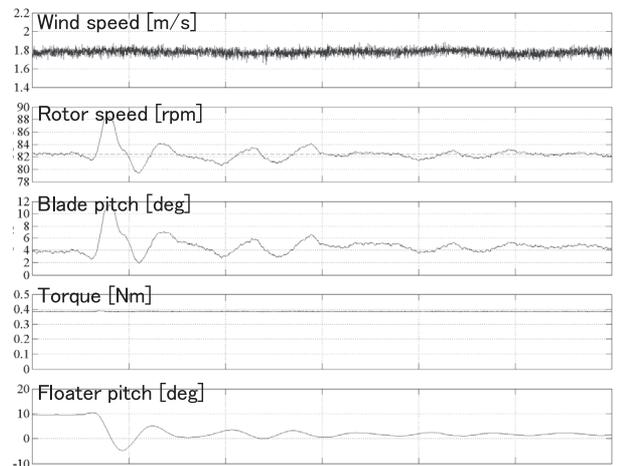


図 8 V 字型セミサブ浮体の応答時系列

時における最大係留力の比較を図 9 に示す。これら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いて推定した解析結果を比較すると安全サイドの設計となっていることから、係留システムの設計手法の妥当性を確認することができた。

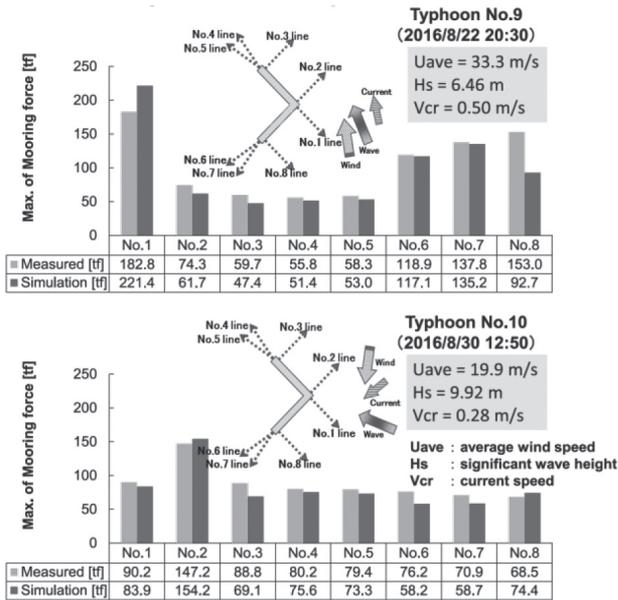


図9 暴風時の係留力計測値と計算値の比較

4. 浮体構造

4.1 浮体構造の特徴

図10に建造中の浮体の写真を示す。



図10 長崎造船所 香焼ドックでの建造風景

前述のコンセプトに従い設計された浮体は以下の特徴を有する。

(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、また一般的なSPAR形式で採用される円筒構造ではない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なく、建造コスト低減、工作精度向上による構造信頼性向上に寄与する。

(2) 自己安定型の浮体

ロ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安定して自立できるため、浮力補助等の特殊な考慮が不要であった。

(3) 浅喫水の実現

本浮体はローハルの浮力により、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。欧州のように静穏で大水深の海域が無い日本沿岸においては、港内の平穏な環境で種々準備工事が可能なこと、また将来発生する大型部品の交換や浮体の撤去といった工事に対応できることは、有効な特徴であると考えられる。

(4) クレーンのリーチ低減

本浮体形式の特徴を活用し、浮体を岸壁に近接して着底させることにより、風車搭載においては、クレーンのリーチ低減を図り、また浮体の動揺が無い状態で工事ができた。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。図11にクレーンによる風車搭載の写真を示す。



図11 小名浜港における風車搭載

4.2 構造の設計手法の検証

本浮体の構造設計は、海洋構造物の設計で用いられる荷重構造一貫解析法に基づき、降伏座屈強度解析については等価設計波法、疲労強度解析についてはフルスペクトル疲労解析法を用いて強度解析を実施した。また、風車荷重については、風車の設計で用いられる風車荷重算出プログラムによる荷重の統計値を使用し、これらを組み合わせることで総合的な浮体構造の強度解析を実施している。

このような構造解析手法により妥当性を検証していた浮体構造であったが、2016年10月、本浮体のローハル構造の一部にき裂損傷が発生するという事象が発生した。この対応にあたっては、本浮体の特徴を活かして、係留した状態で浮体を浮上させ、応急処置として損傷箇所の溶接補修を実施した。

その後、日本海事協会が風力発電設備の支持構造物の設計評価を行うために内部に設置している支持構造物認証分科会にて、損傷発生部の破面観察や浮体運動・応力・係留力のモニタリングデータ等に基づいて、約一年間にわたって原因究明を実施した結果、設計段階においては係留による拘束影響を考慮して強度解析を実施していたが、これによりローハルの水平方向の変位が制限され、ローハルに作用する水平曲げモーメントが過小評価されていることが判明した。そこで、構造解析手法を見直し、係留による拘束影響考慮せず無拘束条件下での強度解析を実施した結果、ローハルに作用する水平曲げモーメントや、実際にき裂が発生した箇所の応力を精度良く再現できることを実測値との比較により確認した。

この解析手法に基づき、当社にて検討した恒久対策構造について強度解析を実施し、同分科会での評価を経て再認証を取得した。

恒久対策構造の改造工事は2018年5月～7月に実施した。この工事は、現地海域にて、新規のストラット構造物を据付け・接合するという前例のない工事であったが、ここでも本浮体の特徴を活かして、海上クレーンや水中溶接などを使用することなく、無事に工事を完了することができた(図12)。

恒久対策工事完了後の約3か月間で3回の台風が現地海域に接近し、有義波高6～7mを観測した



図12 恒久対策工事完了後

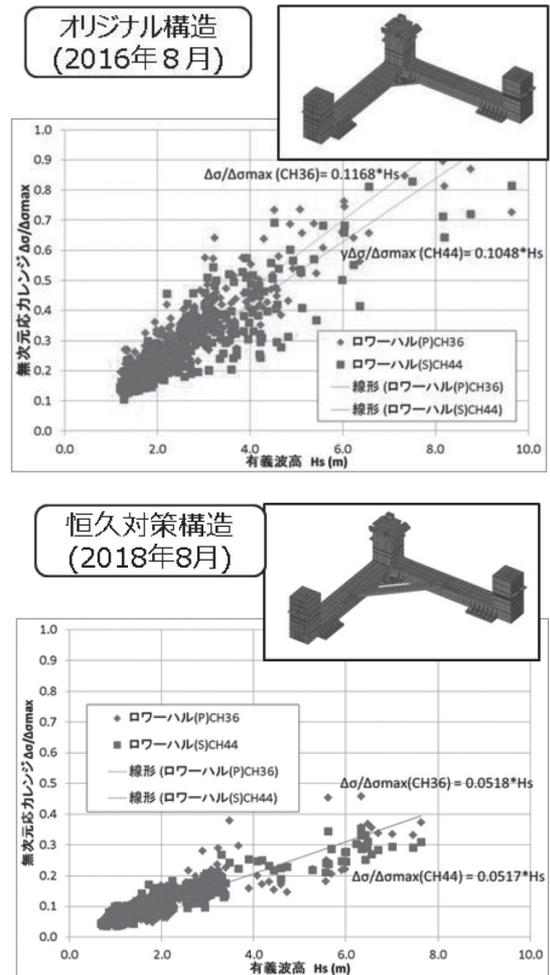


図13 恒久対策前後のノミナル応力比較結果の例

が、応力モニタリングの結果によると、オリジナルの構造に対して恒久対策構造のローハルのノミナル応力値は、目論見通り約50%減を達成していることを確認しており(図13)、これと局所的な応力集中緩和対策との組み合わせで、十分な設計疲労寿命を有することを確認している。引き続き、実証試験にて浮体運動・応力・係留力のモニタリングを実施し、恒久対策構造の妥当性を検証する予定である。

5. おわりに

以上、「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」において当社が建造したV字型セミサブ浮体の設計思想や、設置後に得られた知見を示した。浮体の構造についても、今回の実証研究を通じて設計手法の検証を完了している。

当社のV字型セミサブ浮体については、実海域で得られた知見から運動性能条件の見直しによる浮体の小型化が可能であることを確認しており、係留方式や施工要領の見直しと組み合わせることで経済

性がさらに向上することが見込まれている。本文中
で言及したように、容易に建造できる形状／構造様
式であることから、量産化による産業の創出やウィ
ンドファームの実現で社会に貢献できれば幸いであ
る。

なお、本実証研究は丸紅(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、経済産業
省からの委託事業として推進されている¹¹⁾。本実
証研究事業に尽力されてい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) <http://www.statoil.com/en/technologyinnovation/newenergy/pages/default.aspx>
- 2) <http://www.bluegroup.com/product/phase-1.php>
- 3) <http://www.principlepowerinc.com/products/windfloat.html>
- 4) <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13288>
- 5) 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)
- 6) 太田真ほか，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)
- 7) 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.53 No.2 (2016)
- 8) 太田真ほか，超大型風車を搭載する浮体構造物に関する技術検討 その1 浅海域向け浮体式風車の概念設計，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第19号，2014，pp505-508.
- 9) 太田真ほか，超大型風車を搭載する浮体構造物に関する技術検討 その2 浮体式風車の各種模型試験，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第20号，2015
- 10) Masao Komatsu, et al, Comparison Between Measured Value and Simulated Value of Motion and Mooring Force in Mitsubishi 7MW Floating Offshore Wind Turbine, GRAND RENEWABLE ENERGY 2018, 2018
- 11) <http://www.fukushima-forward.jp/index.html>



小松 正夫 (こまつ まさお)
三菱造船(株) マリンエンジニアリングセンター
主幹技師
海洋開発, 計画設計
masao_komatsu@msb.mhi.co.jp



宮崎 智 (みやざき さとし)
三菱造船(株) マリンエンジニアリングセンター
主席技師
構造設計
satoshi_miyazaki@msb.mhi.co.jp



田中 大士 (たなか ひろし)
(株)MI LNG カンパニー 開発部 開発課
課長
商船基本計画
hiroshi2_tanaka@mi-lng.com



森 英男 (もり ひでお)
三菱造船(株) マリンエンジニアリングセンター
主席技師
基本計画
hideo_mori@msb.mhi.co.jp



太田 真 (おおた まこと)
三菱重工業(株) 総合研究所
主席研究員
海洋工学
makoto_ohta@mhi.co.jp



刈込 界 (かりこみ かい)
三菱重工業(株) 総合研究所
主席研究員
風車工学
kai_karikomi@mhi.co.jp