

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

正会員 太田 真*
熊本 均**

正会員 小松 正夫**
正会員 伊藤 弘人***

Technical Study on the Floating Structure for Mounting a Super-large Wind Turbine
Part 1 Conceptual Design of Floating Offshore Wind Turbine in the Shallow Waters.

by Makoto Ohta, *Member*
Hitoshi Kumamoto

Masao Komatsu, *Member*
Hiroto Ito, *Member*

Key Words: *Floating Offshore Wind Turbine, Semi-Submersible type substructure, Shallow water, Mooring design*

1. 緒言

東日本大震災時に発生した巨大津波により我が国の電力の多くを賄う東北東側沿岸域の発電所は壊滅的な被害を受け、震災復興へ向けた一つの足掛かりとして、再生可能エネルギーの普及が加速している。世界的に見ても広大な経済性水域に恵まれていることもあり、日本沿岸域における浮体式の洋上風力エネルギー利用は、欧米の環境先進諸国からも注目を集めている。

大型風車の設置サイトとして風況が良好な洋上に有望視されているが、電力輸送の観点から陸上系統から大きく離れると経済性が悪化することが知られているため、洋上風車の多くは沿岸域に建設される。着床式洋上風車の実績が豊富な欧州に比べ、急峻な海底地形を有する我が国においては浮体式風車の経済性が勝る海域が増えるものの、比較的浅い海域になることから係留装置の成立性を困難にしている。また、洋上においても風車大型化に伴うコストメリットは明確に顕在するため、基礎となる浮体構造物の負担は増大する傾向にある。一例として、タワー設計とその製造限界、風車搭載工事上の制約、風車搭載後の曳航作業、現地における係留工事や保守作業の制約などが挙げられる。更に、発電事業を視野に入れた場合、大型発電所に匹敵する発電量を賄うための浮体式洋上ファームの規模は大きく、造船所の建造だけでは浮体構造物を供給出来ないという大きな課題がある。

そこで本報では、これら制約条件の下で定格出力 7MW の超大型風車を搭載する浮体基礎を外洋に面した浅水域に設置するための設計思想について言及するとともに、浮体形式選定・形状決定段階及び係留設計段階における解析的なアプローチについて言及する。

2. 概念設計

提案されている様々な浮体式風車には、それぞれメリットとデメリットがあると考えられる。浮体形式の選定に際しては、先ず福島沖 20km の海域に設置することを念頭に置いた¹⁾。即ち、7MW 風車を搭載する浮体喫水が設置水深を越えることが容易に想定できるスパー型を外し、現有の国内作業船・設備では TLP 型の設置はコストの悪化が想定されるので対象外とした。その結果、海底石油開発で実績の豊富なセミサブ型浮体を選定した。

次に、セミサブ型浮体の形状決定においては、a) 自己安定型の浮体、b) 日本の港湾域で建造可能、c) 建造場所が限定されないこと、d) 量産に適したシンプルな形状・構造、e) 風車搭載作業の効率化、f) 重大故障・メンテナンスへの配慮、g) 風車搭載が可能な係留・運動性能を満足することに勘案して実施した²⁾。

開発した V 字型セミサブ風車浮体の主要目を Table 1、概念図を Fig.1、設計条件を Table 2 に示す。

Table 1 Principal dimensions

Rotor diameter	167.00	m
Hub height from sea surface	105.00	m
Length floating structure	84.85	m
Width floating structure	149.91	m
Column width	14.00	m
Draft	17.00	m
Displacement	26,000	ton

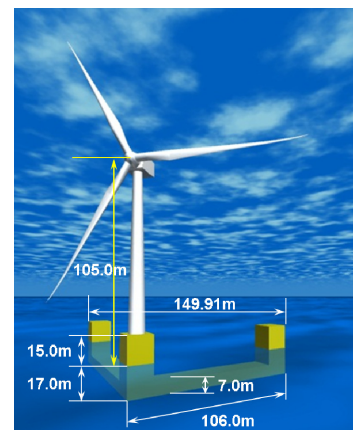


Fig.1 V-shaped Semi-submersible FOWT

* 三菱重工業株式会社 技術統括本部 長崎研究所
** 三菱重工業株式会社 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
*** 三菱重工業株式会社 交通・輸送ドメイン 船舶・海洋事業部 長崎技術部

Table 2 Design Condition

50 Years Storm Condition		
Significant Wave Height	11.7	m
Significant Wave Period	13.0	s
Average Wind Speed	50.7	m/s
Current Speed	1.5	m/s
1 Year Storm Condition		
Significant Wave Height	9.1	m
Significant Wave Period	11.0	s
Average Wind Speed	40.6	m/s
Current Speed	1.0	m/s
Water Depth	120.0	m

浮体設計において最も重要なことは、超大型風車が安全に稼働できる基礎としての浮体を提供することであり、転覆あるいは漂流といった重大事故は決してあってはならない。一方で、上述の建造性、現地工事・保守の利便性及び各種性能は、製品価値に大きく関わってくる。例えば、浮体建造費や動揺性能など部分最適のみで設計を行えば、バリューチェーン全体の視点から評価した場合には、事業性を大幅に下げることがあると考えられる。

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良く知られているが、風車浮体の設計に要求される特徴的なもう一つの性能要件として風車制御系と連動した動的安定性の考慮がある³⁾。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、これら三大性能を全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^{4),5)}、十分な性能を有していることを確認している。以降に、浮体形式選定及び形状決定段階における解析的なアプローチを詳述する。

3. パラメータ解析

セミサブ型浮体の基本構造の選定においては、海洋石油開発における第四世代のプラットフォームに倣って、大口径かつ矩形断面のコラム&ローハルで構成される極めてシンプルな構造を採用した。海面上高い位置で風車が受ける過大なスラストに対抗できる十分な復原力が得られるよう最低限必要となる3本のコラムを配置させ、これらコラム間を2本のローハルでV字型に繋ぐ構造とした。このローハルは幅方向に対する高さを抑えた矩形断面とすることにより、提案されているいくつかのFOWTが備えたHeave Plateと同等以上の減揺効果が期待でき、風や波による外力で発生する過大な曲げモーメントに耐える構造強度を持たせている。また、曳航や風車搭載工事を想定して、喫水変化の自由度(d=3.5~17.0m)を持たせるためのバラストラックとしての役目も大きいと考えた。

更に、環境条件に基づき喫水(17m)やローハル断面(幅14m、高さ7m)など基本的な要件は固定し、静的安定性能及び波浪中動揺性能を対象に、V字配置角度のパラメータ解析を実施した。設計波の波周期とheave固有周期との共振回避を狙いコラムは直径16mの円柱として簡便に検討した。

3.1 静的安定性能

搭載する7MW風車が受けるスラストについては、市販の風車設計用コード; Bladedを用いて定格時を想定したシミュレーション結果の時間平均値を採用し、クライ

テリアとして浮体Roll方向及びPitch方向の定常傾斜の上限を1.5degとした。パラメータとしたV字配置角度; α (deg)は60~105degを15deg間隔として、前述のクライテリアを満足する浮体要目を計算した結果をFig.2に示す。クライテリアを満足する浮体長は約81m、浮体幅や排水量は α によって異なってくるが、浮体建造場所の制約や建造費の増大を招く可能性がある。

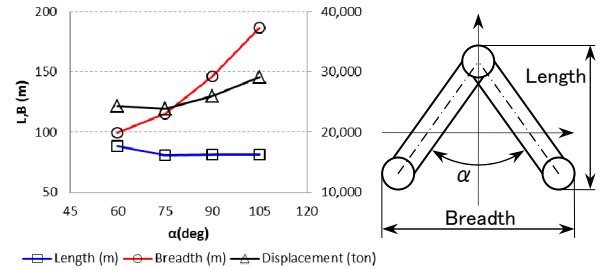


Fig.2 Result of Stability Analysis

3.2 波浪中動揺性能

静的安定性能を検討した4浮体について、50年再現設計波における運動性能を比較する。線形ポテンシャル理論に基づく三次元特異点分法により diffraction/radiation 流体力を数値的に算定し、これらと浮体構造質量や復原力などから構成させる運動方程式を周波数領域で解くことにより、周波数応答関数を求め、線形重ね合せの原理により短期予測を実施した⁶⁾。自由浮体の6自由度の運動を定義すると、規則波中における運動方程式は(1)式で表すことができる。

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = F \quad (1)$$

ここで、

- M : 慣性力係数, 6×6 マトリクス
- A : 付加慣性力係数, 6×6 マトリクス
- B : 減衰力係数, 6×6 マトリクス
- C : 静的復原力係数, 6×6 マトリクス
- η : 運動 ($\eta_j = \eta_{Aj} e^{i\omega t}$, $j=1 \sim 6$), 6×1 マトリクス
- F : 波強制力 ($F_j = F_{Aj} e^{i\omega t}$, $j=1 \sim 6$), 6×1 マトリクス
- ω : 規則波の円周波数

流体力計算に使用した4浮体のパネル分割をFig.3、有義波高11.7m、有義波周期13sにおける重心運動の短期予測結果をFig.4に示す。短期予測の結果、 α の感度影響はSwayとRollに顕著に現れており、特にRollに関しては両舷コラムを連結するローハルが存在しない事による影響と考えられる。

ここで、洋上の風向きは全方位で同じであることが容易に予想されるため、風車を搭載する観点からRollとPitchが殆ど同等となる $\alpha=90deg$ の浮体形状が相応しいと判断できる。以上より、静的安定性能と波浪中動揺性能のバランスに加えて、建造や曳航における優位性を総合的に勘案して浮体形状の選定を実施した。なお、超大型の7MW風車を搭載する浮体基礎として、より安定化させるための動揺低減装置の設計に関してもCFDや水槽試験に基づく知見を反映しつつ実施しているが、それら詳細は続報に譲る。

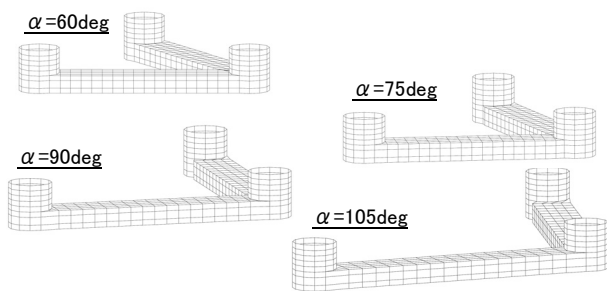


Fig.3 Computational Mesh

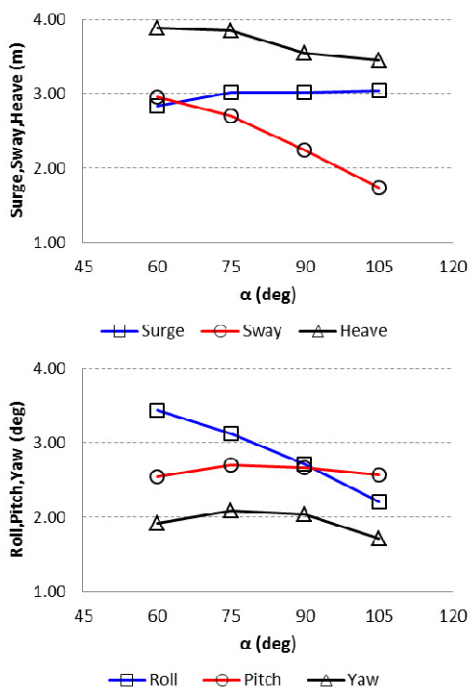


Fig.4 Significant Amplitude at Center of Gravity of FOWT in irregular waves ($H_s=11.7\text{m}$, $T_s=13\text{s}$)

4. 係留設計

国土交通省は国家基幹技術プロジェクトにおいて、浮体位置保持・係留技術を重要な推進項目の1つとして掲げている。福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業で稼働中/建造中の浮体係留装置に、実績豊富なカテナリーチェーン方式が各浮体に共通で採用され、水深100~120mの浅海域に設置されている。係留設計においては、環境外力条件に加え海底地盤条件や国内で使用可能な作業船/工事機材の能力を勘案しながら進める必要がある。V字セミサブ型浮体の係留設計においても、設置海域の潮流条件(1.5m/s)が厳しいこと、前後非対称な浮体形状であること、大きなスラストが作用する風車が浮体前端に配置されていること等が成立性を阻む要因となったが、数値シミュレーションを主体に、水槽試験データによる検証を踏まえて、万一係留索が破断しても十分な安全性を確保することが出来た。ガイドラインに倣い、係留設計におけるクライテリアは以下に示す通りである⁷⁾。水深の6倍以上の索長の大口径チェーン8本を用いて成立した係留配置モデルをFig.5に示す。

- ・非損傷時の50年再現暴風時の安全率 : 2.00
- ・損傷時の1年再現暴風時の安全率 : 1.43
- ・損傷時の50年再現暴風時の安全率 : 1.43

Fig.1に示す概念設計したFOWTを対象にして、前述の解析手法と同様に流体力を算定し、索のカテナリー特性を非線形ばねでモデル化し、環境条件の各荷重から構成される運動方程式を時刻歴で解くことにより係留シミュレーションを実施した。(1)式を変形することにより、次式のように表現する。

$$\eta = (M + A)^{-1} F \quad (2)$$

ここで、 F は流体反力及び外力であり、造波減衰力、非線形減衰力、静的復原力、係留力、波強制力、波漂流力、風荷重、潮流力等の和として表現することにより、外力や係留装置の非線形特性を考慮することが可能になる。ここでは、風車に作用する風荷重はBladedで数値シミュレーションした荷重から抗力係数を算定して変動風を与え、潮流力は水槽試験で計測した抗力係数を採用して荷重算定を定常的に与えた。解析条件は、時間刻み0.1s、計算時間11,000s、荷重立上げ時間200s、係留力評価時間10,800s(三時間)として、荷重組合せや索の破断状態など勘案して数百ケース実施した。係留シミュレーション結果の例として、50年再現暴風時を想定した複合外力下における時系列をFig.6に示す。また、試験詳細は続報に記すが、係留設計データの取得を目的として設置海域相当の水深となるよう仮底及び水流発生装置を仮設して実施した水槽試験の写真をFig.6に示す。

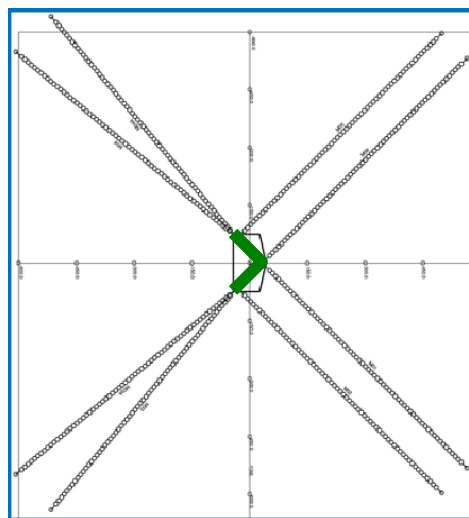


Fig.5 Mooring Arrangement

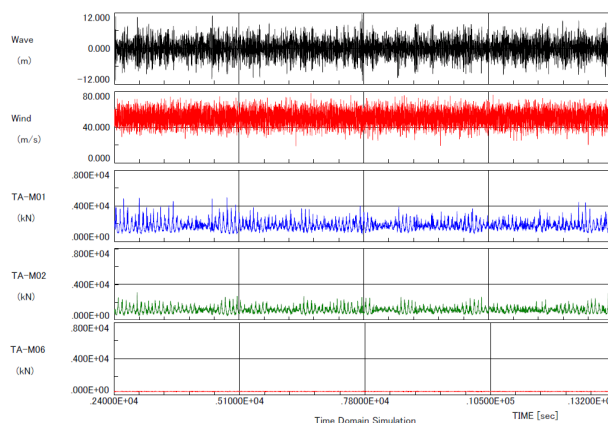


Fig.6 Result of the Mooring Simulation

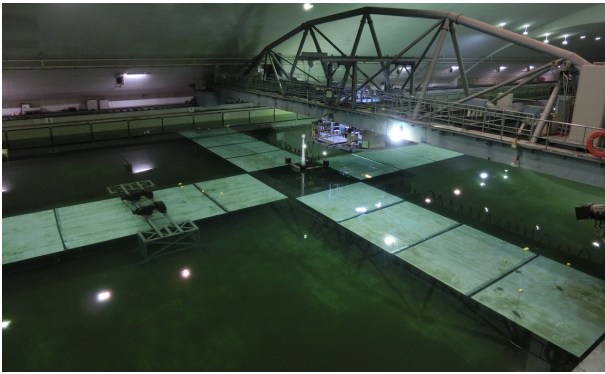


Fig.7 Tank Test Situation

5. まとめ

超大型風車を搭載する浮体基礎を外洋に面した浅水域に設置するための浮体設計思想について言及し、浮体形状選定として実施した静的安定性能及び波浪中動揺性能に関わるパラメータスタディーについて示した。更に、浅海域にV字セミサブ型浮体を安全に係留するための設計法について概説した。

Fig.8 に示すとおり実証実験浮体の建造は完工し、7MW 風車搭載工事を控え 2014 年 10 月末まで長崎湾内に係留されている。新製品創出に向けて実施した多くの水槽試験／風洞試験、流体-構造を連成させた詳細構造解析や認証に関わる解析、長崎から福島までの曳航や風車搭載工事に関わる諸検討、設置後に開始する観測業務など、是非とも別の機会にご報告したいと考えている。



Fig.8 Floating Structure during Towing

謝 辞

「福島復興・浮体式洋上ウイ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推進されています。本実証試験の実現に向けて尽力されているコンソーシアムメンバーの方々により感謝いたします。

参考文献

- 1) <http://www.fukushima-forward.jp/index.html>
- 2) 太田 真, 小松正夫, 伊藤弘人, 熊本 均: 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, pp.27-31.
- 3) Larsen T. *et.al.*: 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
- 4) Makoto Ohta *et.al.*: Development of a V-shaped Semi-submersible Floating Structure for 7MW Offshore Wind Turbine., International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy, 2013
- 5) 刈込 界, 他: 浮体式風車のネガティブダンピングに関する風洞試験, 第 36 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2014 (掲載予定)
- 6) 松浦正己, 他: 係留・連結された複数浮体の波浪中挙動解析法, 三菱重工技報 Vol.31 No.4, 1994
- 7) ClassNK: 浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン, 2012