

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

正会員 太田 真*
 正会員 小松 正夫**
 中村 昭裕***

刈込 界*
 熊本 均**
 川崎 佐年*

Technical Study on the Floating Structure for Mounting a Super-large Wind Turbine

Part 2 Various Model tests of Floating Offshore Wind Turbine

by Makoto Ohta, *Member* Kai Karikomi
 Masao Komatsu, *Member* Hitoshi Kumamoto
 Akihiro Nakamura Satoshi Kawasaki

Key Words: Floating Offshore Wind Turbine, Semi-Submersible type Structure, Tank Tset, Wind tunnel Test, Negative Damping

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。

前報にて概念設計した7MW風車を搭載するV字型セミサブ浮体を対象に、浮体基本性能の把握や各種設計データを取得するための縮尺模型を用いた水槽試験及び風洞試験について報告する。模型試験では、レイノルズ数が実機に比して著しく低下するため、風車模型翼を実機と相似形状で製作した場合、層流剥離や抗力増大により空力性能が乖離して出力及びスラストが大きく低下してしまう問題がある。本論では、浮体式風車固有の問題として指摘されている風車翼制御と浮体回転運動が連成するネガティブダンピングの評価において、異なる相似則の問題を解消するための試験手法について報告する。

2. 模型試験における諸問題

独自開発したV字型セミサブ浮体風車の主要目をTable 1、概念図をFig.1、設計条件をTable 2に示す^{1)・2)}。なおTable 1には縮率1/64で製作した模型要目も併記している。緒言で述べたとおり、風車の翼弦長を代表長さとした実機のレイノルズ数は模型のレイノルズ数の512倍になり、模型翼が風から正トルクを得ることができず、

スケールダウンした定格状態の風速において発電に至らない場合がある。

浮体式洋上風車（以降、FOWT）がトップヘビーであることから、Froude則に倣って模型を製作する際、特に風車翼やタワー等の形状、重量及び剛性を合わせる事が極めて困難となる。また、計測センサーの配置により重心高さが変わり、浮体の動揺特性が異なってしまう問題がある。

更に、FOWTの二大外力が風と波浪であることから、これら荷重を如何にして模擬するかの問題がある。即ち、多くの試験水槽における造波機性能と風洞施設の送風性能を併せ持つ高度な設備が存在しないため、移設可能な送風機を試験水槽に設置して簡易的な風を模擬した試験が数多く報告されている。

Table 1 Principal dimensions

	FOWT	Model	unit
Rotor diameter	167.00	2.609	m
Hub height from sea surface	105.00	1.641	m
Length floating structure	84.85	1.326	m
Width floating structure	149.91	2.342	m
Column width	14.00	0.219	m
Draft	17.00	0.266	m
Displacement	26,000	0.0968	ton

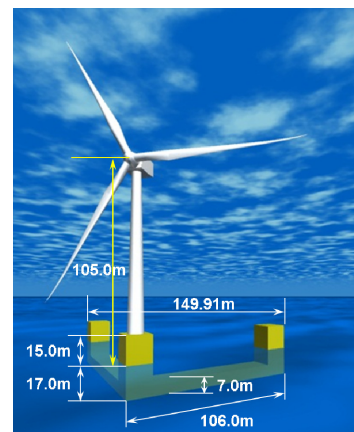


Fig.1 V-shaped Semi-submersible FOWT

* 三菱重工業株式会社 総合研究所 流体研究部 流体第一研究室

** 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 エネルギー・環境ドメイン 再生エネルギー事業部 洋上風車部 開発設計G

前報にて係留設計の重要性について言及したが、カタナリー方式の場合には係留索の特性を模擬する上で水槽水深を実機に合わせることを優先させるべきと考える。海域によっては海流や潮流による流れが係留設計に大きく影響する場合があります、外力として合理的に模擬しなければならない。

そこで、各種設計データの取得や設計認証コードの検証データ取得を目的に、その調査目的に応じて当社保有の大型水槽設備/風洞設備を用いた模型試験を実施した。

3. 水槽試験

耐航性能水槽（長さ 160m×幅 30m×深さ 3.1m）では簡易送風機を設置し、自由動揺試験、波浪中応答試験、曳航試験を実施した^{3),4),5)}。また、係留装置の安全性を確認するために仮底や水流発生装置を設置した波浪中試験も別途実施している。

縮率 1/64 の浮体模型を製作し、これに 2 種類の風車模型を搭載した。浮体模型はアクリル材料を用いて形状を実機と相似に製作した。特にローハル部はアルミ板のサンドイッチ構造を採用して曲げ剛性を実機に合わせている。風車 I 模型は既製の塩ビ製パイプを加工し風車とタワーの重量重心が実機と相似となるように製作した。風車 II 模型は、C-FRP を積層して翼やナセル主寸法が相似になるように製作し、さらにタワー部はアルミ板を機械加工することにより形状・重量・曲げ剛性がほぼ相似になるように製作した。さらに、ナセル内にモーターとギアを収納し、ロータを所定の回転数で回転させ、翼ピッチの変更を可能にした。また、MS-Board と呼ばれる独自開発の動揺低減装置を各コラムの下端近傍に設置した。係留設計に倣い、既製のチェーンを水槽に緩く展張して模型を係留した。模型概観を Fig.2, 水槽試験の状況を Fig.3, 福島沖を想定した係留配置概要を Fig.4 に示す。計測項目は、浮体運動、ローハル表面歪、係留索張力、タワー基部荷重、ナセル加速度である。



Fig.2 FOWT Model

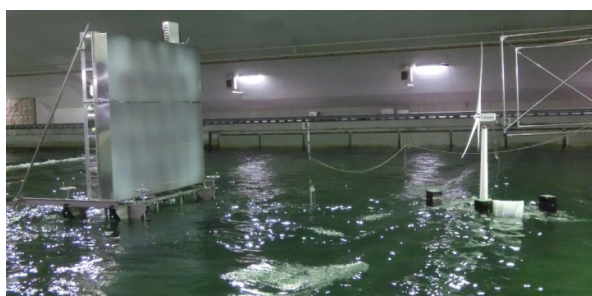


Fig.3 Tank Test Situation

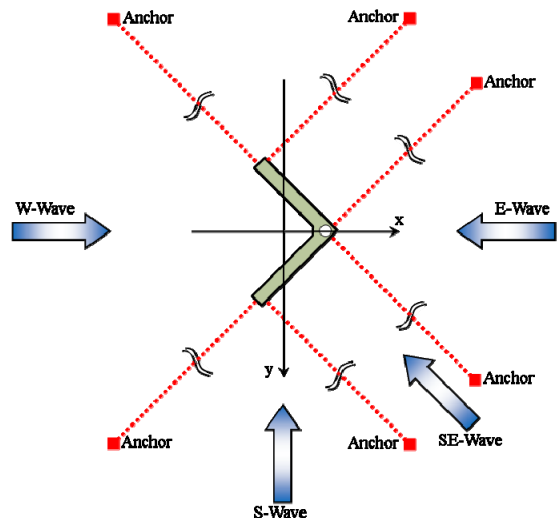


Fig.4 Mooring Arrangement

代表的な水槽試験結果として、規則波中における風車 I 模型の周波数応答関数を Fig.4 に示す。上段に E 系波、下段に S 系波、左側に Heave、右側に Pitch の結果を示している。△印は MS-Board 無し、□印は MS-Board 有りの結果をプロットした。グラフ中の実線はパネル法による MS-Board 無しの計算結果で、自由動揺試験で得られた非線形減衰力を考慮した運動方程式を周波数領域で解いて推定した。MS-Board 有りの Pitch 結果は、MS-Board 無しに比べて、ピークが長周期側へシフトしていることが見て取れる。この原因として、MS-Board の装着により非線形減衰力が増大したことによる影響と考えられる。浮体横方向から入射する S 系波においても Pitch が発生しているのは、本浮体の前後非対称な形状に起因している。

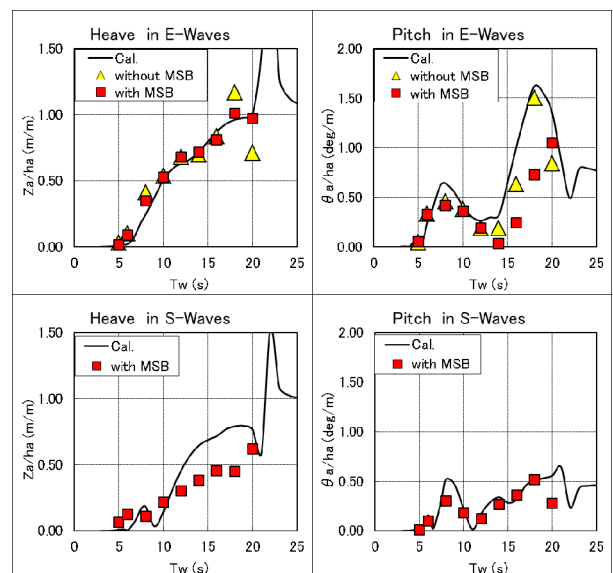


Fig.5 Response Amplitude Operator

前述の通り、模型のレイノルズ数は実機の 1/512 倍となり、風車の空力特性が模擬できない。そこで、本試験では風車から浮体に伝達する荷重に着目して、スラストやタワー基部に作用する曲げモーメントが等価になるように翼のピッチ角度を選定し、Froude 則でスケールダウンした一様風及び不規則波を同時に発生させた。試験条件

を表 Table 2 に、定格発電時の Pitch 統計結果を Fig.6 に、50 年暴風時の結果を Fig.7 に示す。Pitch 平均値は、風車に作用するスラストが最大となる定格発電時に 1.3deg 程度、タワー基部の曲げモーメントが最大となる 50 年暴風時でも 2deg を越えない。Pitch 最大値/最小値は、定格発電時で 3deg 以下、50 年暴風時で 6deg 以下であり、安定性能と耐波性能に優れた浮体であることが分かる。

Table 2 Test Condition

	Full scale	Model scale
Rated Power Generation (Case-RPG)	U=12.0 m/s Hs=3.2 m Ts=7.5 s	U=1.50 m/s Hs=50 mm Ts=0.94 s
50 Years Storm (Case-50YS)	U=50.0 m/s Hs=11.7 m Ts=13.0 s	U=6.25 m/s Hs=183 mm Ts=1.63 s

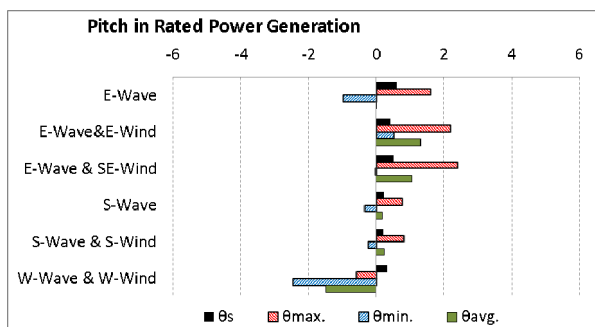


Fig.6 Statistical Results of Pitch in Case-RPG

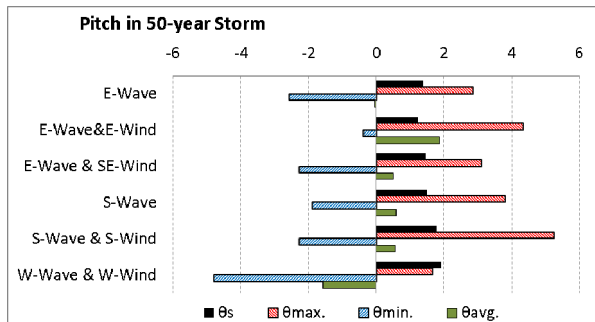


Fig.7 Statistical Results of Pitch in Case-50YS

4. 風洞試験

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主体に実施した^{6),7)}。ネガティブダンピングは、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 FOWT 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⁸⁾。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。製作した風車模型を Fig.8、ロータ回転数制御を動作させて定常風に対する風

車出力特性及びスラスト特性を計測結果を Fig.9 に示す。低レイノルズ数に適した翼厚比が小さい翼型を採用して再設計された翼は実機形状から大きく歪んでおり、最大コード長は実機の約 3 倍となる。実機風車の定格風速は 12.0m/s (模型 1.5m/s) 定格出力は 7MW (模型 3.34W)、定格回転数は 10.3rpm (模型 82.4rpm) である。再設計した翼が実機風車とほぼ同等の定常特性を有すること、定格風速以上の風速域でスラストが減少し負勾配になっていることを事前に確認している。

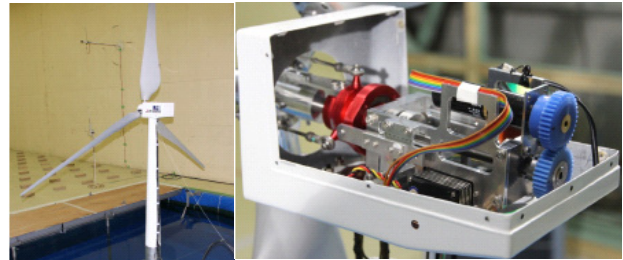


Fig.8 Wind Turbine Model

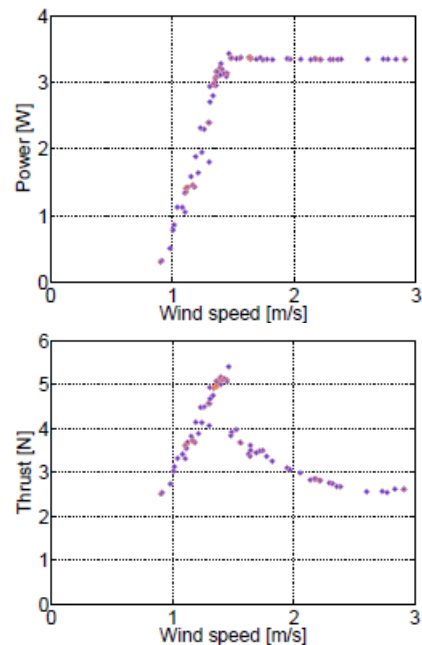


Fig.9 Power Curve and Thrust Curve

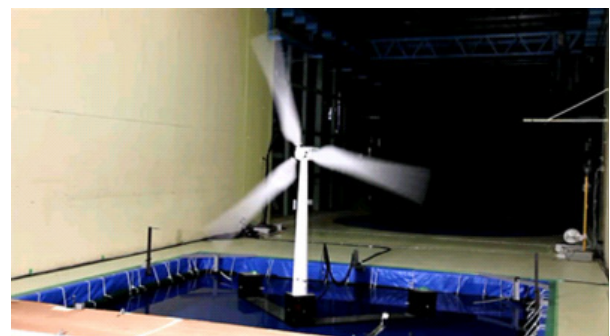


Fig.10 Wind Tunnel Test Situation

本風洞試験では、7MW 風車を搭載予定の二種類の浮体を対象に実施している。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スパー型浮体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）を発生させた時の計測波形を Fig.11 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が確認できた。

一方、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い。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して計測した波形を Fig.12 に示すとおり、従来の翼ピッチ制御のまま動揺上殆ど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。

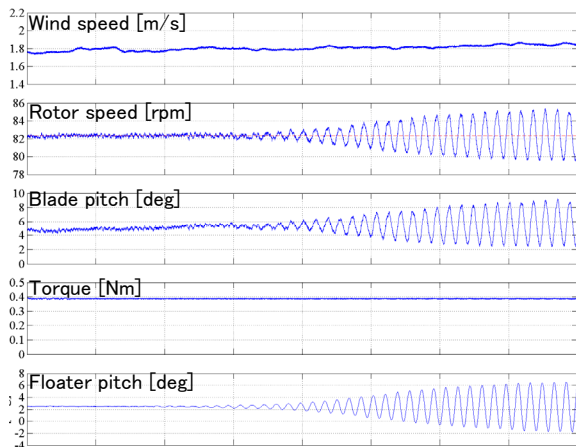


Fig.11 Advanced- SPAR type FOWT Responses of Conventional Blade-pitch Controller

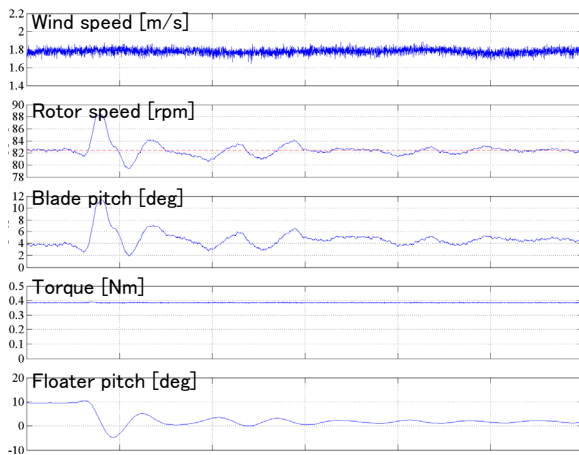


Fig.12 V-shaped Semi-submersible FOWT Responses of Conventional Blade-pitch Controller

5. まとめ

超大型風車を搭載する浮体構造物を対象にした模型試験の諸問題について言及し、水槽試験並びに風洞試験を計画する上で、特に異なる相似則の問題を解消するための試験手法について示した。独自開発したV字型セミサブ浮体が優れた安定性能や耐波性能を有することを示し、FOWT 固有の問題であるネガティブダンピングも問題ないことを実験的に確認した。

福島県小名浜港において実証実験浮体に 7MW 風車を搭載する工事が 2015 年 6 月末までに完工し、同 8 月までに福島沖に係留される予定である。新製品創出に向けて実施した流体-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、引き続きご報告したいと考えている。

謝 辞

「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ご心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 太田 真, 小松正夫, 熊本 均, 伊藤弘人: 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.
- 2) <http://www.fukushima-forward.jp/index.html>
- 3) 太田 真, 他: 7MW 洋上風車のための V 字型セミサブ浮体の開発, 第 35 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2013, pp.209-212.
- 4) 中村昭裕, 他: 7MW V 字型セミサブ浮体式洋上風車の荷重計算, 第 35 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2013, pp.213-216.
- 5) 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
- 6) 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, 297-300.
- 7) Karikomi, K. *et al.*, "Wind Tunnel Testing on Negative-damped Responses of a 7MW Floating Offshore Wind Turbine," EWEA Offshore 2015, 2015.
- 8) 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