

# 実船データを用いた風車浮体の挙動解析手法の評価

Validation of the Motion Analysis Method of Floating Offshore Wind Turbine Using Observation Data



設計本部 船舶海洋設計部 船体計画 G
吉本 治樹 YOSHIMOTO Haruki
設計本部 船舶海洋設計部 構造 G
松岡 諒 MATSUOKA Ryo

概要

浮体式洋上風力発電の設計では、浮体運動を高い精度で推定することが重要である。特に水平軸風車 を搭載した浮体式洋上風力発電は、重い構造物である RNA (Rotor Nacelle Assembly)をタワーの上 に設置する必要があり、浮体運動がタワー基部の設計に大きな影響を与える。タワー基部は、損傷する と風力発電機の倒壊に直接つながるため、十分な信頼性を要求される部材である。また、浮体運動の推 定は一般的な海洋構造物と同様に、浮体構造にかかる荷重を推定する際の基本であり、構造の信頼性確 保に必要不可欠である。本研究では、実際の実証研究事業で計測された波・風のデータを用いて、ポテ ンシャル理論や風車浮体連成解析により得られる運動および構造応答と、実際に計測された運動および 構造応答を比較し、それら解析手法の妥当性を評価する。

### Summary

In the design of floating offshore wind turbines, it is important to estimate motions with high accuracy. Especially, floating offshore wind turbine equipped with horizontal axis wind turbine requires heavy RNA (Rotor Nacelle Assembly) to be installed on the tower, and the floater motion greatly influences the design of the tower base. The tower base is required to have sufficient reliability because it directly leads to collapse of the wind turbine if it is damaged. Also, estimating the motion is the basis for estimating the load on the floating structure. In this research, we compare the motion and structural response obtained by potential theory and coupled analysis with actually measured motion and structural response using the measured wave and wind data. And, we evaluate the validity of the analysis method.

# 1. 緒 1

1.1 浮体式洋上風車の荷重と構造

風車浮体の設計に用いられる技術には、従来のオイ

ル&ガスの産業で広く導入されてきた海洋構造物の技術を転用しているケースが多い。これは、浮体部が持つ本質的な機能が位置保持及び耐航性であるためである。

一方で、風車浮体と従来の海洋構造物との大きな違 JMU テクニカル・レビュー No.1 (2019 年 7 月) いは搭載される機器と構造である。風車浮体の上に設 置される機器は概ね RNA (Rotor Nacelle Assembly) とタワーのみであるが、風車浮体の構造強度の点から 成立性を確認する際、浮体運動の影響が支配的となる タワー基部等の風車部への荷重が重要となる。

# 1.2 浮体式洋上風車の運動

風車浮体の運動はその周期特性や起因する力により 様々な種類の成分に分けることができる。風車部荷重 に大きく影響を与える運動は下記の3運動である。

- ・波を外力とする波周期動揺
- ・風によるスラスト力に起因する準静的な傾斜
- ・風車制御によるスラストカの変動に起因する動的 な傾斜

特に、風車制御による運動は制御アルゴリズムや浮 体が持つ減衰力の大小により大傾斜運動となりうるこ とが知られており、設計時に正しく評価することが非 常に重要である。この運動は、一般的な海洋構造物で は存在しない風車浮体に固有の特徴的な運動である。

このような特殊な運動を設計に織り込むため、IEC や各国船級協会が定める風車浮体の設計ガイドライン では、風車-浮体の時刻歴連成解析を実施することが 要求されている。本浮体の設計でも一連の連成解析を 実施した。

# 1.3 目的·手法

本研究では、設計時に用いた解析手法の妥当性を検 証するため、実際に計測された環境条件での解析値と 実機で計測された計測結果とを比較する。比較する値 は、浮体の静的傾斜、動的影響および構造応答応力と する。

# 2. 対象プロジェクト

# 2.1 プロジェクト概要

本研究で解析対象とする風車浮体について、その設備の概要を説明する。

本浮体は、資源エネルギー庁の福島洋上ウィンドフ アーム実証研究事業にて JMU が設計・建造・設置を 受託した 5MW 洋上風力発電浮体「ふくしま浜風」 である。浮体は 2016 年 8 月に設置され、2019 年 6 月現在も福島県沖約 20km の海上で運転中である。 発電された電力は海底ケーブルを経由して浮体式洋上 変電所(「ふくしま絆」、JMU で設計・建造・設置) に送られた後、昇圧・陸上へと送られ、既存の送電網 に送電されている。

浮体の主要目を表1に示す。また、設置状態の浮

体イメージ図および写真を図1に示す。

表 1 浮体主要	目
----------	---

Table 1 Principal particulars

Item	Value	
Length	58.9 m	
Bredth	51.0 m	
Depth	48.0 m	
Draft(Operating)	33.0 m	
Maaring	6 Line, 132mm R3S Chain	
Mooring	Catenary	



図 1 ふくしま浜風外観図 Fig. 1 Outline of Fukushima Hamakaze

浮体部の形状は JMU が開発したアドバンストスパ ー型である。アドバンストスパー型とは、浮力を発生 させる「ハル」と、ハル同士を結合させる「コラム」 が鉛直に重なる構造を特徴とする浮体形式であり、波 浪中の低動揺性能が最大の利点である。

搭載風車は日立製作所製の 5MW ダウンウィンド 型風車(ローター直径 126m) である。回転数とスラ ストカの制御には、ブレードピッチ浮体振動制御 (FVC: Floating Platform Vibration Control) と呼 ばれる制御手法が採用されており、ブレードピッチ角 度を独立に調整する機能を備えている。

# 2.2 計測データの取得・変換

- 2 -

浮体の運動データや構造歪データは浮体で逐次記録 され、陸上のサーバに格納されている。計測項目の概

JMU テクニカル・レビュー No.6 (2019 年 7 月)



要を表 2 に示す。なお、X, Y, Z は、浮体の中立位置 を原点とする空間固定座標系である。

#### 表 2 計測項目の概要

Table 2 Table of measurement items

Item	Device	Resolution	
Motion & Strain (on Floating Wind Turbine)			
X, Y, Z	RTK-GPS	20Hz	
Doll Ditch	FOG	2011-	
Koli, Pitch	(Fiber Optic Gyro)	20HZ	
Yaw	Satellite Compass	20Hz	
Strain	Strain gauge	20Hz	
Environment (on Substation)			
Wind Valasity	Analog Anemometer	20Hz	
wind velocity	(3 cup type)		
Wind Direction	Analog Anemometer	20Hz	
wind Direction	(Blade type)		
Wave Height /	Wave Meter	20 min	
Period / Direction	wave Wieter	(Statistical Data)	

水平変位は、浮体上に設置された RTK-GPS(Real Time Kinematic GPS)により計測される。RTK-GPS は数 cm の精度で 20Hz で計測できるため、小波高時 の波周期運動のような、一般的な DGPS(Differential GPS)では精度が得られにくい波浪中動揺でも十分な 精度で計測することができる。

また、回転運動は FOG およびサテライトコンパス にて計測される。FOG はタワー基部に位置する計測 室内に設置しており、浮体の Roll, Pitch を計測する ことを主目的としている。浮体の低動揺性能を考慮し、 0.01 度の分解能を有する FOG を採用した。また、 Yaw は浮体デッキ上に設置されたサテライトコンパ スにて計測した。

計測された運動データは計測装置位置での運動を示 しているため、比較検証がしやすいよう重心位置の6 モード運動データに変換した。変換式を次式に示す。

> $G(x, y, z) = R \overline{AG} + A(x, y, z)$ (1)

*R* : Rotation matrix calculated from roll, pitch, yaw G(x, y, z): Translation of the vessel reference point A(x, y, z): Translation of the RTK-GPS antenna position

また、中立位置からの絶対変位を Surge と Sway の二乗平均、合成傾斜角を Roll と Pitch の二乗平均 として別途算出した。

### 2.3 気象海象データの取得

気象海象データは、風車浮体から約 2km 離れた海 上に設置された洋上サブステーションにて計測された データを使用した。

風速、風向、乱流強度などの風況は、風況観測タワ ーに設置された三杯式風速計および矢羽根式風向計で 計測された値を使用した。空気密度はデッキ近傍に設 置された気圧計と温度計から算出した値を用いた。

波高や波周期、波向きは洋上サブステーションの没 水部に設置された海象計の計測値を使用した。

#### 解析手法 3.

本研究の目的は設計手法の検証であるため、運動解 析には設計時に用いた市販の連成解析ツールである Bladed を使用した。浮体部モデルには、流体力特性 として JMU の特異点分布法解析プログラムにより解 析した波強制力、付加質量係数、造波減衰係数を入力 している。また、二次の減衰力をモデル内にて再現す るため、モリソンモデルベースの抗力梁を別途定義し ている。係留系は設計と同様に 6 本のチェーンカテ ナリー係留を模擬している。

風車部のモデルは、風車製造者である日立製作所に より作成されたモデルを用いた。ブレードピッチコン トローラは、実際の運転状況で用いたコントローラを 用いている。

#### 比較検証 4.

### 4.1 静的傾斜の比較

#### 4.1.1 概要

解析値と計測値の比較検証として、まず静的傾斜の 比較検証を実施した。静的傾斜とは、数分間程度以上 で安定したレベルで維持される浮体の傾斜状態のこと を指す。風車浮体の静的傾斜の計測値と解析値を比較 することで、風車のスラスト力特性および浮体復原力 のモデル化の妥当性を検証することができる。

ここでは、浮体傾斜角の計測値と解析値いずれも 10 分間の平均値を対象とした。解析値は、平均風速 0.5m/s ごとに算出し、定常風における浮体の絶対傾 斜角とした。

#### 4.1.2 対象期間の選定

比較する期間は 2017 年 11 月から 2018 年 3 月に 計測されたデータから選定した。風車荷重が安定的に 支配している状態を選定するため、10 分間風車の運 転状態が変わらず、波が比較的穏やかである期間を選

- 3 -



定した。選定した期間の風速と波高の関係を図 2 に 示す。



図 2 選定した期間の風速と波高条件

Fig. 2 Weather and sea conditions of selection period

#### 4.1.3 比較検証(静的傾斜)

解析値及び計測値の比較を図 3 に示す。なお縦軸 は、解析値の最大傾斜角を 1 として無次元化した値 である。

図 3 からは、計測値と解析値が概ね一致している ものの、一部の風速域で計測値が解析値より小さくな っている。平均風速 11m/s から 14m/s の定格風速 (13m/s)付近の範囲で計測値が解析値よりも小さい 傾向が認められるが、この原因は風車の浮体動揺制御 の影響と想定される。





以上の比較検証より、風車のスラスト力に対する浮 体の復原力およびその推定に用いた解析手法は妥当で あったといえる。

#### 4.2 動的影響の比較

#### 4.2.1 概要

次に、浮体運動の動的影響の比較として、風車運転 中の浮体挙動の特性比較を行った。

解析は不規則風・不規則波条件を入力する時刻歴解 析とし、解析シード(風速や波高を作成するためのラ ンダムシード)に依存する結果のばらつきを最小限と するため、各ケース 6 シードの乱流データを用いて 解析を行い、各解析結果の統計値を平均した値を各ケ ースの解析値とした。

解析に用いる環境条件として、以下の計測値を用い た。

・風速、風向、乱流強度、ウィンドシア

- ・空気密度
- ・有義波高、波周期、波向き

なお、風スペクトルは設計値の Kaimal モデルとし、 波スペクトルはブレッドシュナイダー光易型の長波頂 不規則波とした。

#### 4.2.2 対象期間の選定

本検証で着目するのは風車運転時の浮体の動的挙動 であるが、風車の荷重が浮体の動的挙動に与える影響 が大きくなる状態の1つが定格風速以上の風速域によ る運転である。本検証でもこの影響に注目するため、 定格風速以上で運転している 10 分間×2 期間を選定 した。選定した期間とそれぞれの気象海象条件を表 3 に示す。

表 3 選定した期間の気象海象条件

Table 3 Selected periods and sea conditions for dynamic

behavior comparison

		Casel	Case2
Wind velocity	m/s	15.0	19.0
Wind direction	deg	129.2	135.8
Flow inclination	deg	0.0	0.0
Turbulence intensity	%	5.16	5.42
Wind shear exponent	-	0.03	0.10
Air density	kg/m <sup>3</sup>	1.26	1.21
Significant wave height	m	1.36	1.49
Significant wave period	s	5.3	4.6
Wave direction	deg	118	111

#### 4.2.3 比較検証(動的影響)

表 3 に示した環境条件を Bladed に入力、解析し、 計測値と比較した結果を図 4 に示す。解析値の上に

- 4 -



示すエラーバーは 6 シードの解析結果の範囲を示し ている。図から、6 シードのばらつきが一部で大きい もの、解析値が概ね一致、または安全側の評価となっ ていることがわかる。

本結果より、風車運転時の動的挙動についても設計の妥当性が確認された。



図 4 動的挙動の計測値と解析値の比較 Fig. 4 Comparison of dynamic behavior

# 4.3 構造応答応力の比較

#### 4.3.1 概要

本風車浮体の構造設計においては、波荷重、風荷重、 及び風車のオペレーションに伴う荷重が連成する影響 を考慮する為、連成解析結果に基づいた応力応答の時 系列解析を実施している。本検証では、実海域で風車 が稼働している期間において解析条件と対応する期間 を選定し、歪みゲージによって得られた応力変動と設 計時の解析結果における応力変動を比較検証する。

### 4.3.2 比較対象箇所

比較対象箇所を図 5 に示す。対象箇所は 6 か所で、 それぞれ下記の部材である。

B1, B2:コラム内側(ロワーハル付近)

- C1, C2: コラム内側 (アッパーハル付近)
- D1, D2: アッパーハル内部隔壁





図 5 比較対象箇所(B, C, D) Fig. 5 Point of comparison (B, C, D)

#### 4.3.3 比較対象ケースの選定

設計時には、風車が稼働している期間を想定した気 象海象条件の異なる解析を数 10 ケース実施している。 本検証では、気象海象の条件が計測海象に近い表 4 の解析結果を用いて比較を行った。比較に用いた解析 値は、表 4 の解析条件の下で、初期値が異なる 4 ケ ースの時系列荷重データを用いて実施した構造解析結 果から算出した。

comparison			
Wind velocity	m/s	12.0	
Wind direction	deg	240.0	
Turbulence intensity	%	16.3	
Significant wave height	m	1.92	
Significant wave period	s	5.6	
Wave direction	deg	240.0	

表 4比較対象とする設計時の解析条件

Table 4 Analysis conditions at design stage for

比較対象とする計測期間、及び各期間における気象 海象条件を表 5 に示す。各ケースの計測期間は 10 分 間で、下記条件に適合する期間として選ばれた 3 ケ ースである。

- ・風速、有義波高、波周期が表4の解析条件に近い
- ・波向きと風向きの差異が 10deg 以下

- 5 -

・風車が10分間比較的安定して稼働している



|--|

Table 5 Selected	neriods and sea	conditions
Table 5 Selected	perious and sea	contantions

		Case1	Case2	Case3
Wind velocity	m/s	11.1	11.3	12.8
Wind direction	deg	183.0	174.0	169.0
Turbulence intensity	%	6.8	5.3	3.3
Significant wave height	m	2.0	2.0	2.0
Significant wave period	s	5.9	5.9	5.9
Wave direction	deg	180.0	167.0	173.0

#### 4.3.4 比較結果

計測値および解析値の比較を図 6 に示す。縦軸は、 それぞれの応力変動の標準偏差を設計海象において浮 体全体で想定される応力の最大値で割ることで算出さ れる無次元値とした。



Fig. 6 Comparison of structural response

解析期間、評価対象箇所により傾向が異なるが、全体としては概ね良く一致していると言える。また、ケース間での結果のばらつきに関しても、計測値と解析値で同程度であった。誤差の要因としては、実物とモデルの差異や波スペクトルの差異などが想定される。

上記の誤差要因を考慮しても全体的に概ね良く一致 していると言え、設計手法は妥当であったと言える。

### 5. 結 言

- 実海域に設置された実スケール浮体式洋上風車の稼働状態における運動を、長期間連続的に高 精度で計測することができた。
- 静的な傾斜の計測値と解析値を比較することで、
   風車のスラスト力に対する浮体の復原力および
   その推定に用いた解析手法が概ね妥当であった
   ことが示された。

風車浮体の動的な影響に着目し、計測された環 境データを用いて風車浮体の制御を含めた連成 解析の解析値と、計測された浮体運動および構 造応答を比較した。その結果、解析手法が妥当 であることが確認された。

# 参考文献

- H. Yoshimoto, H. Yoshida, K. Kamizawa: Validation of Applicability of Low Frequency Motion Analysis Theory Using Observation Data of Floating Offshore Substation, Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, (2018)
- 2) H. Yoshimoto, K. Kamizawa: Validation of the Motion Analysis Method of Floating Offshore Wind Turbines Using Observation Data Acquired by Full Scale Demonstration Project, Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, (2019)
- 3) R. Matsuoka, H. Yoshimoto: Verification of Precision Concerning the Design of Advanced Spar Type Structure, Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.20, 2015 S-OS1-1, (2015)



吉本 治樹 松岡 諒

- 6 -