

2MW ダウンウィンド風車搭載浮体式洋上風力発電設備

支持構造物の荷重予測*

Load Prediction of Support Structure of a 2MW Downwind Floating Offshore Wind Turbine

山口 敦**

スバナポン・ダヌポン**

石原 孟**

Atsushi YAMAGUCHI

Subanapon Danupong

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

浮体式洋上風力発電設備の支持構造物の設計では、着床式洋上風力発電設備にも作用する風荷重・波荷重に加えて浮体の動揺による荷重も考慮する必要がある。設計時にこれらの荷重を推定するために、動解析が行われているが、問題点も残されている。Ishihara and Zhang¹⁾ はセミサブ浮体に搭載した 2MW 風車を対象とした動解析を実施した。しかしながら浮体に搭載された風車では、浮体の弾性変形のため固有周期がもとの風車タワーの固有周期より長くなるという問題が知られており、疲労荷重の高精度な同定のためにはこの効果を考慮したモデルが必要とされている。

Robertson et al.²⁾は、種々の動揺解析モデルを用いて NREL 5MW 風車を搭載したセミサブ式浮体の動揺解析を行い水槽実験により検証したが、すべての動揺解析が、水槽実験で計測される浮体の固有周期近傍の浮体動揺応答を過小評価するという問題点を指摘した。しかしながら、水槽実験では計測ケーブル等が浮体動揺に影響を与えることが避けられず、実機による検証が必要とされている。また Xu and Ishihara³⁾ は風車停止時に浮体のピッチ動揺とサージ動揺が浮体式洋上風車のタワー荷重に与える影響を定量的に評価したがピッチ動揺による荷重とサージ動揺による荷重の相関が 1 であると仮定しているため荷重を過大評価している。

そこで本研究では福島県沖に設置された 2MW ダウンウィンド風車を搭載したセミサブ浮体式風力発電設備(図 1)を対象とし、浮体の弾性変形を考慮したモデル化手法を提案するとともに、波および風の外力を考慮した動解析を行い風車タワーに作用する荷重を推定し、実測により検証する。また、浮体式風車のタワーに作用する荷重の成因を分析するとともに、それぞ

れの相関を考慮して合成する手法を提案する。



図 1 福島沖 2MW 風車搭載セミサブ浮体

2. 風車・浮体・外力のモデル化

風車モデルとしては、山口ら⁴⁾によって提案された 2MW 標準風車モデルを用いた。制御モデルとしては Yousefi et al.⁵⁾ によって提案されたモデルを用いた。このモデルでは発電機のトルク制御は全域にわたり発電機回転数の関数とするとともに、ピッチ制御は発電機回転数を用いた PI 制御としている。

浮体式洋上風力発電設備の動解析を行うためには、風車モデルに加えて、浮体・係留のモデル化を行う必要がある。本研究では浮体は剛体と仮定し、6 自由度を持つものとした。浮体に作用する流体力係数は Liu and Ishihara⁷⁾ に従い設定した。また波強制力についてはポテンシャル理論に基づく数値解析により求めた。また、浮体式に搭載された風車では浮体の弾性変形が全体の固有モードに影響するため、浮体を剛体としてモデル化する場合には風車タワーの固有周期がずれることが指摘されている。このため、本研究では浮体を FEM によりモデル化し、境界条件を自由端とした固有値解析を行い(図 2)、浮体式洋上風力発電設備全体の固有モードと固有振動数を求めることによりタワーの 1 次モードに相当する固有周期を求め、この固有周期に一致するようにタワーの剛性を調整した。この効果については次節で説明する。

*第 42 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

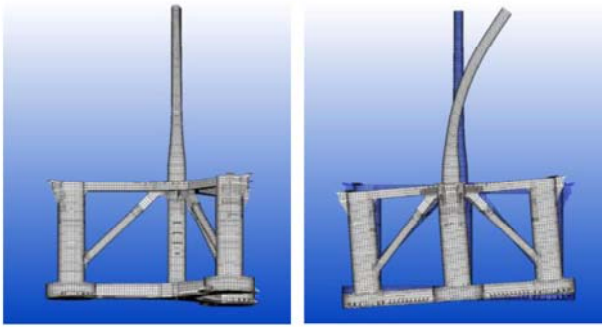


図2 浮体式風車の FEM モデルとタワー 1 次モード

動解析の入力の一つである風速場は国際標準 IEC61400-1 で定められている Kaimal モデルを用い、乱流強度は同標準で定められた標準乱流モデルを用いた。また風速の鉛直分布を規定すべき指数は 0.1 とした。もう一つの重要な入力である波は JONSWAP スペクトルモデルに従う不規則波を用い、形状パラメータは 2.87 とした。

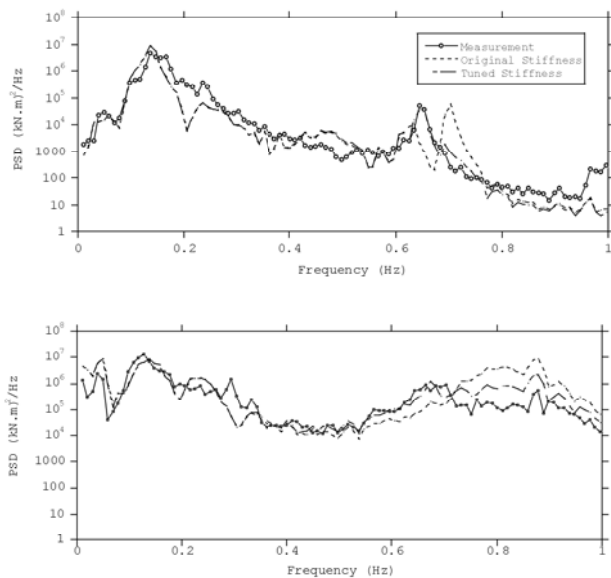


図3 タワー基部モーメントのパワースペクトル密度:
(a) 停止時; (b) 運転時

3. 浮体式風力発電設備の応答解析と検証

前節で述べたように、浮体を剛体としてモデル化するとタワー1次固有周波数が実際より高くなる。本研究では剛体の浮体上に設置された風車タワーの剛性

を調整することによりこの問題を解決した。表1に示す風車停止時および運転時を対象として、浮体動揺シミュレーションを行った結果から求めたタワー基部モーメントのパワースペクトル密度を観測値とともに図3に示す。風車運転時、停止時ともに見られる0.2Hz以下の低周波域のピークは浮体の剛体運動の固有周波数に相当するものである。また風車停止時には0.6Hz付近にピークが見られるが、これはタワー1次モードのピークである。当初モデルではこのピークが0.7Hz付近に見られるが、これは浮体を剛体と仮定した際のタワー1次固有周期である。実際の浮体は弾性体であるため、タワーの1次固有周期は低周波側に少し移動するが、本研究で提案したモデルではこの現象が再現できていることがわかる。

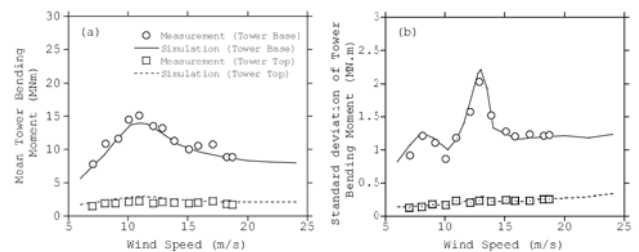


図4 風車運転時の風速別タワーモーメント:
(a) 平均値; (b) 標準偏差

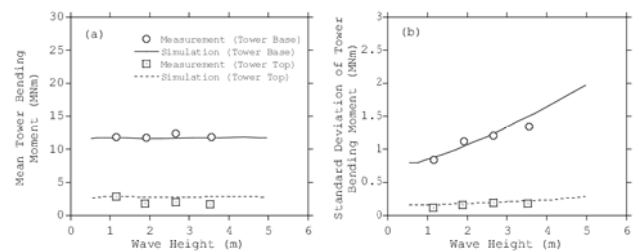


図5 風車運転時の波高別タワーモーメント:
(a) 平均値; (b) 標準偏差

次に風車運転時において風速がタワー頂部と基部のモーメントに与える影響を評価する。ピーク波周期 $T_p = 10s$ 、有義波高 $H_s = 1.75m$ 、風向と波向のミスアラインメント $\theta_{mis} = 0^\circ$ の場合に風速を変化させてタワーモーメントを解析し、実測と比較した(図4)。実測データは $8s \leq T_p < 12s$ 、 $1.5m \leq H_s < 2.0m$ 、 $-15^\circ \leq \theta_{mis} < 15^\circ$ の範囲の全てのデータを風速ビン別に平均

表1 解析の対象とした観測データ

日時 (JST)	風車状態	風速 (m/s)	乱流強度 (%)	風向 (deg)	有義波高 (m)	ピーク周期 (s)	平均波向 (deg)
2015/3/16 09:50	停止	2.7	7.0	113	1.2	8.0	153
2015/4/4 3:20	運転	15.3	5.2	7	2.1	8.9	176

したものである。平均成分・変動成分ともに風速に大きく依存し、タワー基部モーメントの平均値は定格風速周辺で最大値を示す。また、シミュレーション結果は観測とよく一致している。

ピーク波周期 $T_p = 10\text{s}$ 、風速 $u = 9\text{m/s}$ 、風向と波向のミスアラインメント $\theta_{\text{mis}} = 0^\circ$ の場合に有義波高を変化させてタワーモーメントを解析により評価し、実測と比較した(図 5)。実測データは $8\text{s} \leq T_p < 12\text{s}$ 、 $8\text{m/s} \leq u < 10\text{m/s}$ 、 $-15^\circ \leq \theta_{\text{mis}} < 15^\circ$ の範囲の全てのデータを波高ビン別に平均したものである。解析結果と観測結果はよく一致している。また、平均モーメントは有義波高に依存しないが、モーメントの変動成分は有義波高に依存し、波高が増大するにつれて変動モーメントが増大することがわかる。またタワー基部と比較してタワー頂部では波高の影響が少ないこともわかる。

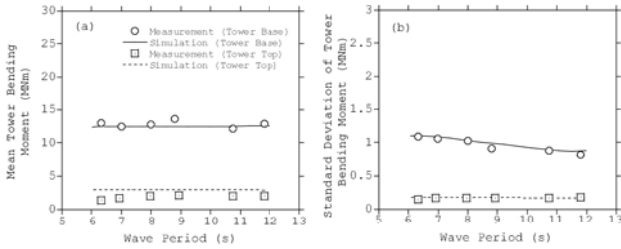


図 6 風車運転時の波周期別タワー基部モーメントの平均値(a)および標準偏差(b)

有義波高 $H_s = 1.75\text{m}$ 、風速 $u = 9\text{m/s}$ 、風向と波向のミスアラインメント $\theta_{\text{mis}} = 0^\circ$ の場合にピーク波周期を変化させてタワーモーメントを解析し、実と比較したものを図 6 に示す。解析結果は実測とよく一致している。また、有義波高の場合と同様に平均モーメントはピーク周期に依存しないが、変動モーメントは依存する。また、ピーク周期が増大するにつれ、タワーモーメントの変動成分は低減する。これは、波高が同じ場合には、周期が短いほうが浮体の加速度が大きくなり、加速度に起因する慣性力によるモーメントが相対的に大きくなるためと考えられる。

4. 発電時のタワー荷重の成因とモデル化

前節で述べたようにタワー基部モーメントは、浮体の加速度に起因する慣性力による成分がある。この成分はさらに浮体のピッチ運動に起因する成分およびサージ運動に起因する成分に分解できる。その他の変動モーメントの原因としては、浮体傾斜角の変動による重力、運転時の変動スラスト力が考えられる。こ

れらの成分がどのように風車基部タワーモーメントに影響を与えているかについて、表 1 に示す運転時と停止時の例についてシミュレーション結果を用いて考察した。この場合の風車タワー基部モーメントの変動成分のパワースペクトル密度を図 5 の黒線で示す。また、変動スラスト力に起因する変動タワー基部モーメント、浮体傾斜時の重力に起因する変動タワー基部モーメント、浮体ピッチ運動の加速度に起因する変動タワー基部モーメント、浮体サージ運動に起因する変動タワー基部モーメントをシミュレーション結果から求め、それぞれのパワースペクトル密度を図 7 の赤点線、赤鎖線、青一点鎖線、青鎖線で示す。またそれぞれの成分を時刻歴で合成したもののパワースペクトル密度を黒点線で示す。0.4Hz 以下の低周波域では、合成したものは参照値にほぼ等しく、風車タワー基部モーメントはこれらの成因によって説明できることがわかる。0.4Hz 以上の高周波域では、合成したものはタワーの 1 次固有周期などの共振成分が含まれないため、運転時・停止時とも参照値と比較して小さくなっている。

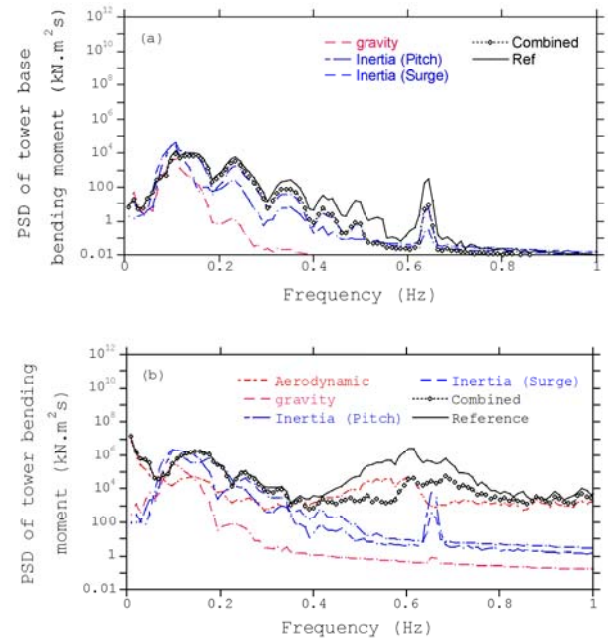


図 7 前後方向タワー基部モーメントのパワースペクトル密度: (a)風車停止時; (b)風車停止時

以上の考察に基づいてタワーモーメントの変動成分の各成因からタワーモーメントの標準偏差を推定する。ここでは風速 6m/s 、有義波高 1m のケースについて波高別のシミュレーション結果を用いた。これまでの議論ではそれぞれの成分を時刻歴で加えたが、標

準偏差から推定するためにはそれぞれの成分の相関を考慮する必要がある。風車停止時・運転時について各成分の相関を図8に示す。図8から下記のことがわかる。

- 1) 浮体のピッチ加速度に起因するモーメントと浮体傾斜による重力に起因するモーメントの相関(ρ_{ag})は空力減衰の影響が無視できる停止時には1であり、運転時には0.6である。
- 2) 1)で求めた浮体のピッチ運動に起因するモーメントと浮体のサージ運動に起因するモーメントの相関(ρ_{Mpi})は、浮体のピッチ加速度とサージ加速度の相関(ρ_{Api})に等しい。
- 3) 2)で求めた浮体運動に起因するモーメントと変動スラスト力に起因するモーメントの相関(ρ_{tf})は0である。

これらの仮定に基づき求めたタワー基部および頂部のモーメントをシミュレーションから求めた参照値と比較したものを図9に示す。参考までに風車停止時に関しては従来の Xu and Ishihara³⁾の手法により推定した値も示す。従来の手法では過大評価していたモーメントを本手法では精度よく評価できていることがわかる。

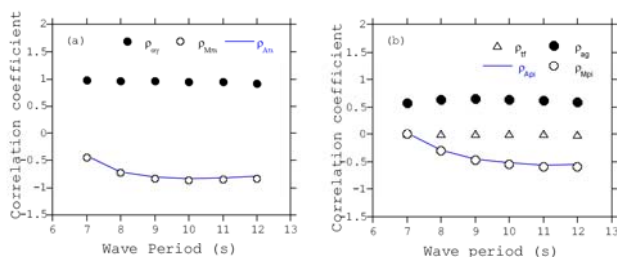


図8 各成分の相関: (a)停止時; (b)運転時

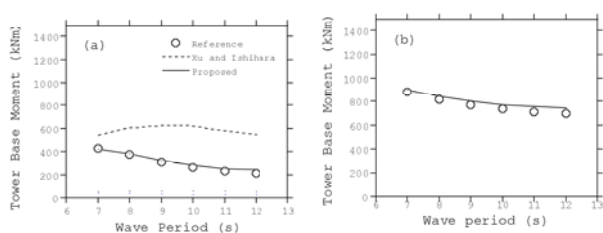


図9 タワー基部モーメント: (a)停止時; (b)運転時

5. まとめ

本研究では、浮体式洋上風力発電設備の動揺を解析し、支持構造物に作用する荷重を予測し、実測データを用いて検証し、以下の結論を得た。

1. 浮体の弾性変形を考慮するために風車タワーの

剛性を調整する方法を提案した。提案した手法を用いて予測した浮体搭載風車のタワーモーメントは実測とよく一致した。

2. タワーモーメントの平均荷重・変動荷重は風速によって大きく変動する。またタワーモーメントの平均荷重は波高・波周期には影響されない一方、変動荷重は波高が増大するにつれ増大し、周期が増大するにつれ減少することを明らかにした。
3. タワー基部モーメントの変動成分は風車に作用するスラスト力の変動、浮体加速度による慣性力、浮体傾斜による重力によって説明できる。またピッチ動揺に起因するモーメントとサージ動揺に起因するモーメントの相関は、ピッチ加速度とサージ運動の相関にほぼ等しいことを明らかにした。これらのことを用いてタワーモーメントの標準偏差を推定することを可能にした。

謝辞

本研究は経済産業省の委託事業である福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業(Fukushima FOWarD)の一部として実施された。ここに記して関係者の皆様へ感謝の意を表す。

参考文献

- 1) T. Ishihara and S. Zhang, Prediction of dynamic response of semi- submersible floating offshore wind turbine using augmented Morison's equation with frequency dependent hydrodynamic coefficients, *Renewable Energy*, 131, 1186-1207, 2019.
- 2) A. Robertson et al., OC5 Project Phase II: Validation of Global Loads of the DeepCwind Floating Semisubmersible Wind Turbine, *Energy Procedia*, 137, 38-57, 2017.
- 3) N. Xu and T. Ishihara, Prediction of tower loading of floating offshore wind turbine systems in the extreme wind and wave conditions, *Wind Engineering*, 38(5), 463-476, 2014.
- 4) 山口敦・林岑蔚・石原孟, 浮体式洋上風車風力発電支持構造物の荷重予測(その1) 2MW ダウンウィンド標準風車モデルの作成と実測による検証, 土木学会第回年次学術講演会, 2020.
- 5) I. Yousefi, A. Yamaguchi and T. Ishihara, The Effect of Control Logic on Wind Turbine Tower Load, *Grand Renewable Energy Conference*, Yokohama, 2018.
- 6) Y. Liu. and T. Ishihara, Prediction of dynamic response of semi-submersible floating offshore wind turbines by novel hydrodynamic coefficient model, *Journal of Physics: Conference Series*, 1356(1), 2019.