

空力弾性解析を利用した 1MW 風車ドライブトレインの風荷重と動的応答の評価に関する研究*

A Study of Wind Loading and Dynamic Response of a 1MW Wind Turbine Drivetrain by Aeroelastic models

石原 孟**

王帥***

吉村豊**

Takeshi ISHIHARA

Shuai WANG

Yutaka YOSHIMURA

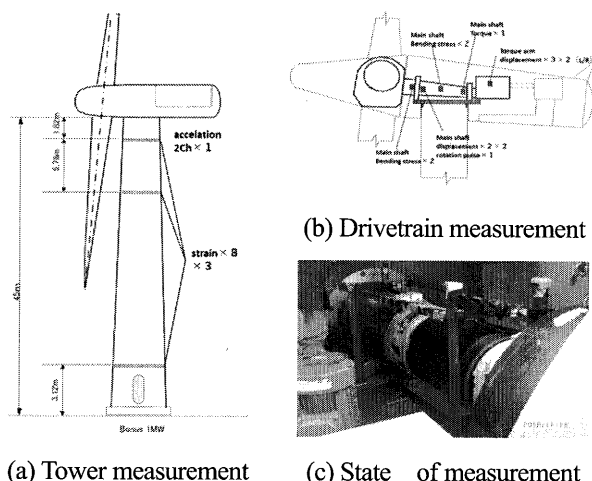
1. はじめに

風車の稼働率向上のため、風車ドライブトレインの信頼性向上が求められている。現在、最も普及している誘導発電機を有する風車のドライブトレインは主軸を2つ主軸軸受とトルクアームからなる4点支持構造(Four-Point Mounting)と1つの主軸軸受とトルクアームからなる3点支持構造(Three-Point Mounting)の2タイプに大別される。3点支持構造の主軸の故障率が高いことが問題となっている¹⁾。例えば、瀬棚臨海風力発電所では、2006年の運開より10年間で、4点支持構造であるVestas V-80の主軸の故障率は0%であるのに対して、苫前グリーンヒルウィンドパークでは、1999年の運開より15年間で、3点支持構造であるBONUS 1 MWの主軸の故障率は65%となっている¹⁾。3点支持構造のドライブトレインは日本で導入されている風車の40%以上を占め²⁾、3点支持構造の主軸軸受の疲労寿命が短い原因の解明が急務となっている。

そこで、本研究では苫前グリーンヒルウィンドパークに設置された3点支持構造でアクティブストール制御のBONUS 1 MW 風車を対象に当該機のタワーおよびドライブトレインの現地観測と空力弾性モデルによる動的解析の結果について報告する。

及びタワーにおいてひずみゲージと加速度、トルクアームにおいて変位計を設置し、動態観測を行った。これら計測の概要を図2に示す。動態観測に合わせ、対象風車近傍でライダーにより風況観測も実施した。計測期間は平成27年11月から平成28年1月の3ヵ月である。

空力弾性解析用のドライブトレイン、タワーの構造モデルおよび風車の制御モデルは、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説2010年版³⁾に基づき作成し、空力弾性解析はNRELが開発したFASTを用いた。



(a) Tower measurement (c) State of measurement

Fig.2 Measurement items of field observation

対象風車におけるブレードの諸元および空気力係数は実機相当に設定し、翼型はNRELによるストール制御用翼型S818, S825, S826を用いた。構築したモデルの妥当性を検証するため、風車の観測値と予測値を比較した。観測値の詳細については参考文献⁴⁾を参照されたい。構築した構造モデルを用いて評価したタワーおよびブレードの固有周期は観測値と一致し、構築した構造モデルの妥当性が検証された。

3. タワー基部モーメントの評価

構築した空力弾性モデルおよび風車制御モデルを用いて、タワーの動的応答を評価した。風車制御モデルでは、オフセットを設けたスプリットピッチ制御(Split

2. 現地観測と空力弾性モデルの概要

対象ウインドファームのレイアウト及び風車の仕様を図1に示す。本研究では、ドライブトレインの主軸

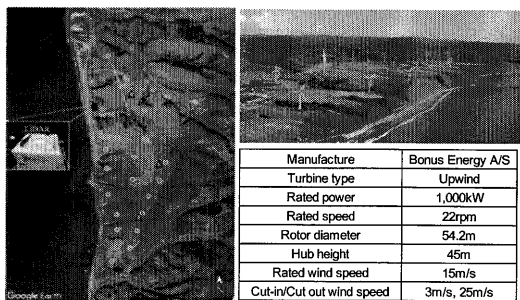


Fig.1 Layout of windfarm and specification of wind turbine

*平成30年12月5日第40回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演
**会員 東京大学大学院工学系研究科〒113-8656東京都文京区本郷7-3-1
***非会員 同上

pitch control offset angle)を用いた。これは対象風車がアクティブストール機であり、ストール領域でのタワー共振の回避等が必要とされるためである⁵⁾。具体的には、ブレード2のオフセットを0とし、ブレード1と3にそれぞれ同じ角度で正負のオフセットを設定した。

その手順は以下の通りであり、各風速でのピッチ角度の設定の結果を表1に示す。

- 1) まず風速に合わせて、3つのブレードの初期ピッチ角度 α_1 を決定する(表1の1~3列)。
- 2) 次に、高風速域で発生する負減衰を抑制するために、風速ごとにピッチ角度にオフセット $\Delta\alpha_2$ を加える。オフセットは高風速域の18m/s以上では ± 6 度、16m/s以下では ± 2 度とした(表1の4~6列)。
- 3) 最後に、各風速におけるブレードのピッチ角 α は初期ピッチ角度 α_1 とオフセット $\Delta\alpha_2$ との和から求める(表1の7~9列)。

Table 1 Summary of adopted pitch angle

Wind speed	α_1 (Initial pitch angle)			$\Delta\alpha_2$ (Offset pitch angle)			Total pitch angle (α)		
	Blade1	Blade2	Blade3	Blade1	Blade2	Blade3	Blade1	Blade2	Blade3
6	0	0	0	-2	0	2	-2	0	2
8	0	0	0	-2	0	2	-2	0	2
10	0	0	0	-2	0	2	-2	0	2
12	0	0	0	-2	0	2	-2	0	2
14	-1.22	-1.22	-1.22	-2	0	2	-3.22	-1.22	0.78
16	-1.75	-1.75	-1.75	-2	0	2	-3.75	-1.75	0.25
18	-0.94	-0.94	-0.94	-6	0	6	-6.94	-0.94	5.06
20	-0.04	-0.04	-0.04	-6	0	6	-6.04	-0.04	5.96
22	0.95	0.95	0.95	-6	0	6	-5.05	0.95	6.95
24	2	2	2	-6	0	6	-4	2	8

図3と図4にはそれぞれタワー基部モーメントの平均値と標準偏差を示す。図4にある矢印は風速20m/sの時の予測値が非常に大きいことを示す。タワー基部モーメントの平均値の予測値は観測値と良く一致しているが、タワー基部モーメントの標準偏差の予測値はスプリットピッチ制御を採用していない場合には、低速域で過小評価され、高風速域で大きく過大評価している。この過大評価はストールに起因するタワー振動であり、スプリットピッチ制御を適用した場合には、この過大評価が改善された。

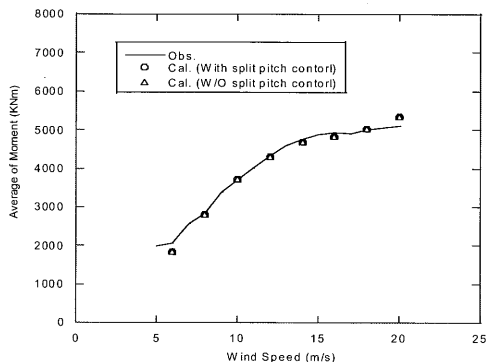


Fig.3 Variation of predicted and measured mean tower base moment with wind speed

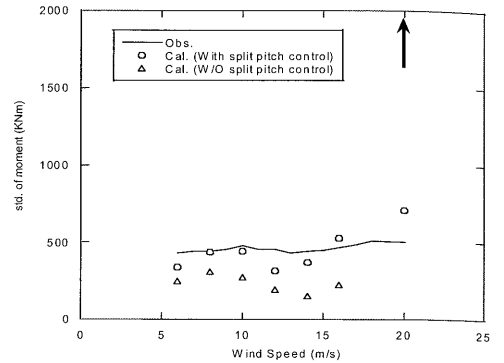


Fig.4 Variation of predicted and measured fluctuating tower base moment with wind speed

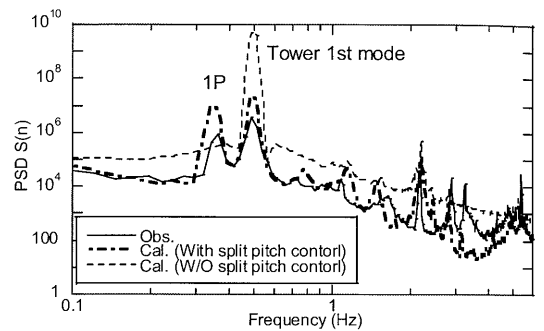


Fig.5 Power spectra of predicted and measured fluctuating tower base moment at 20m/s

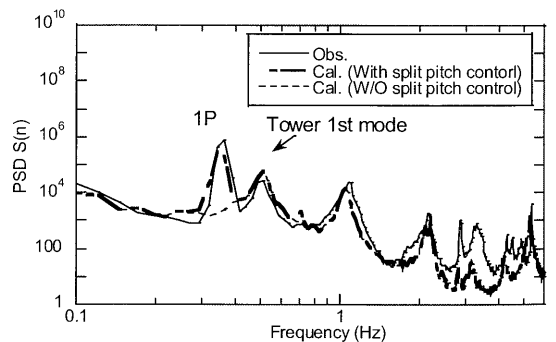


Fig.6 Power spectra of predicted and measured fluctuating tower base moment at 6m/s

図5と図6にはそれぞれ風速20m/sと風速6m/sの時のタワー基部モーメントのパワースペクトルを示す。高風速域(図5)では、スプリットピッチ制御を用いない場合にはタワーの固有振動数に対応するピークが過大評価され、用いる場合にはこのピークが抑えられ、観測値と一致する。一方、ロータの回転に対応するピークはスプリットピッチ制御を用いない場合には再現されないことが分かる。低風速域(図6)でも同じであり、タワー基部モーメントの標準偏差の過小評価の原因にもなっている。

4. トルクアーム変位の評価

トルクアームは円筒上のラバーを内装する左右のブッシュから構築され、ドライブトレイン内の様々な振動を吸収する役割を果たしており、重要である。本研究ではトルクアームの挙動を明らかにするために、左右のブッシュ直上にレーザー変位計を設置し、トルクアームの3方向の変位を計測した。その結果、X方向ではスラスト力およびZ方向のねじれモーメントにより最大2mm程度、Y方向にはY方向の力およびZ方向のねじれモーメントにより最大1mm程度、Z方向では発電時のトルクにより最大3.5mm程度変位していることが分かった。

本研究では、図7に示すドライブトレインを3点支持構造を表現できる3次元モデルを作成した。このモデルではロータ重量および風荷重は3次元モデルの左側に作用し、ギアボックスの重量は3次元モデルの右側に作用する。トルクアームのブッシュはばねと減衰で表現し、主軸軸受はラジアル方向(Y軸とZ軸)とアキシャル(X軸)方向のばねを表現した。

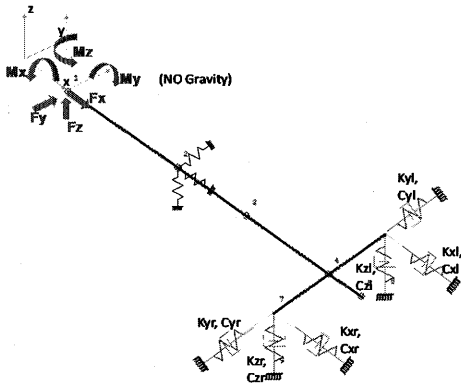


Fig.7 Three dimensional model of drivetrain

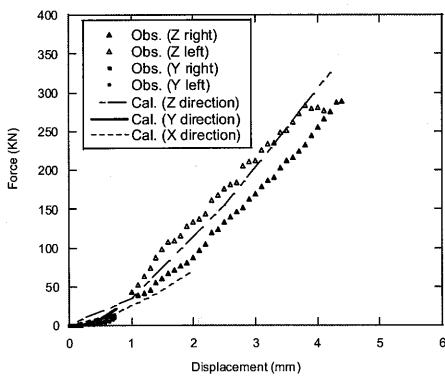


Fig.8 Relationship between force and bush displacement

ブッシュの剛性は、動態観測から得られた変位とブ

ッシュに作用する力から算定した。図8にはそれぞれY方向とZ方向の力とブッシュの変位の関係を表し、既往の研究⁶⁾から得られた剛性特性と同様な傾向を示す。図中の曲線は、変位の範囲を考慮した各方向の変位と力の関係を示す。YとZ方向の非線形ばねモデルはYとZ方向の力から求めた平均変位が観測値と一致するように同定した。またX方向の非線形ばねモデルはYとZ方向の非線形ばねモデルの傾きから内挿した。一方、ブッシュの減衰比は、主軸の曲げモーメントに起因する振動を表現するために、各方向共に10%を適用した。主軸軸受のばね定数は、主軸軸受の仕様及び現地計測から軸受の諸元と荷重条件により算出し、ラジアル方向は算定値の100%とし、アキシャル方向は平均変位が観測値と一致するように40%に低減した。

図9と図10にはそれぞれトルクアームにおけるX, Y, Z方向変位の平均値と標準偏差の風速による変化を示す。構築した3次元モデルの有用性を示すために、通常主軸軸受の設計で用いられている1次元ビームモデル(パラメータは3次元モデルと同じ)による予測結果も併記した。

図9(c)と図10(c)から、Z方向のトルクアーム変位の平均値と標準偏差の予測値は観測値と良く一致し、ロータとギアボックスの自重により、右側の変位は左側の変位より若干大きくなっていることが再現されている。また1次元モデルによる予測値は3次元モデルによる予測値および観測値と一致することから、Z方向のトルクアームの変位は1次元モデルにより予測可能であることが分かる。

図9(b)と図10(b)にはY方向のトルクアームの変位を示し、平均値と標準偏差の予測値は観測値とほぼ一致している。Z方向に比べ、Y方向のトルクアームの変位が小さい。その理由は、Y方向の力およびZ方向のねじれモーメントが小さいことによるものである。Z方向と同じように、1次元モデルによる予測値は3次元モデルによる予測値および観測値と一致しており、Y方向のトルクアームの変位も1次元モデルにより予測可能であることが分かる。

図9(a)にはX方向のトルクアームの平均変位を示す。3次元モデルによる平均値については予測値は観測値はほぼ一致し、左右の非対称性もよく再現している。一方、1次元モデルではY方向の力とZ方向のねじれモーメントによるX方向変位への影響を再現できないため、左右のトルクアームの変位の予測値は同じ値になってしまう。標準偏差(図10(a))については両モデルとも過小評価している。これはアキシャル方向の剛性を線形的に40%に低減したことによるものであり、

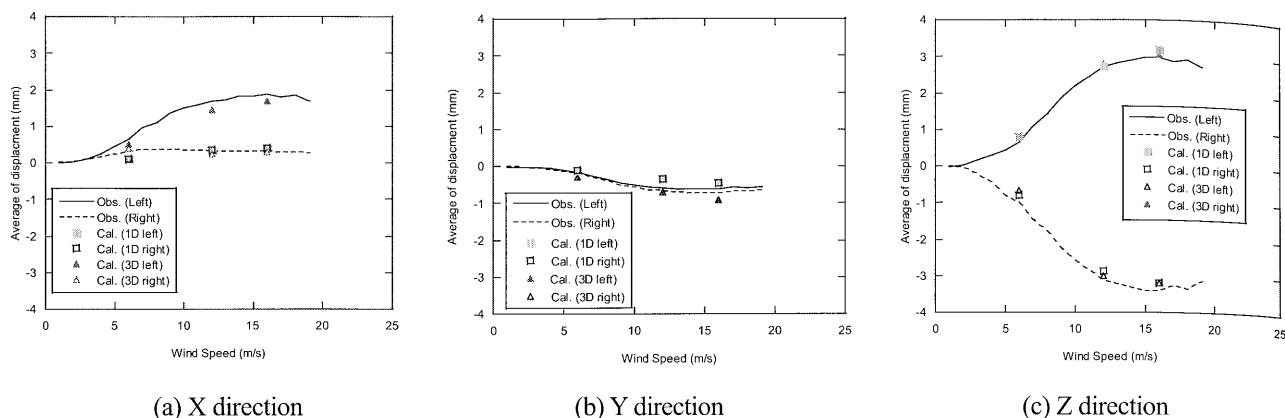


Fig.9 Variation of mean displacements of torque arm with mean speeds

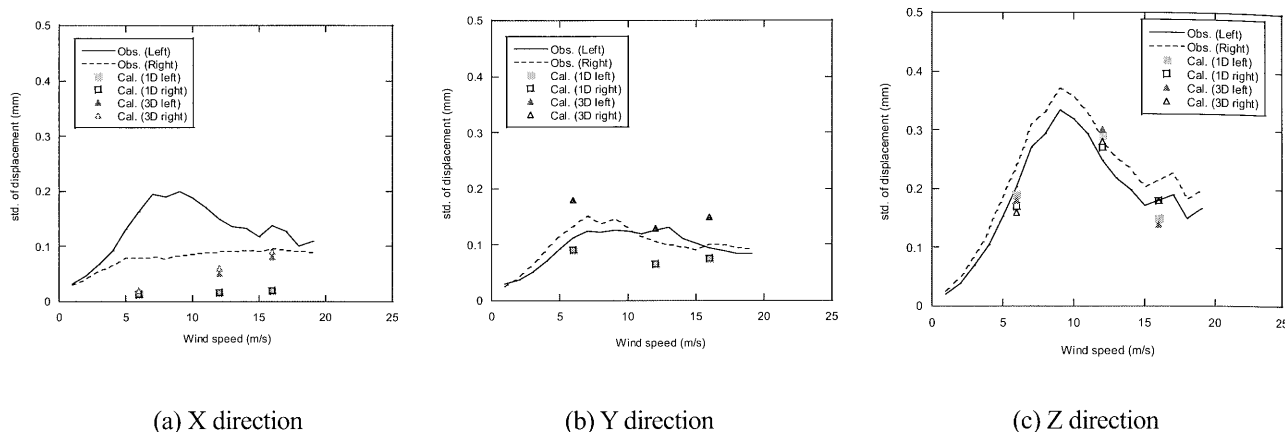


Fig.10 Variation of fluctuating displacements of torque arm with mean speeds

今後非線形バネを用いて改善する予定である。

5. まとめ

本報告では苫前グリーンヒルウィンドパークに設置されたアクティブストール制御の BONUS 1 MW 風車を対象に現地観測を実施し、空力弾性モデルによる風荷重とトルクアームの挙動を評価し、以下の結論を得た。

- 1) 通常のアクティブストール制御モデルは高風速域でのタワー基部モーメントを過大に評価するが、スプリットピッチ制御を採用することにより、タワーの共振が抑えられるとともに、ロータの回転に対応する 1P のピークを再現でき、観測値とも一致することが分かった。
- 2) トルクアームの 3 次元モデルを作成し、従来の 1 次元モデルと観測値と比較した結果、3 次元モデルは、トルクアームの 3 方向の平均変位を精度よく予測できるが、従来の 1 次元モデルは X 方向のトルクアームの平均変位の非対称を再現できないことが分かった。

謝辞

本研究は NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託業務「スマートメンテナンス技術研究開発」

で得られた研究成果である。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 株式会社ユーラスエナジージャパン, 苫前グリーンヒルウィンドパーク 11 号風車破損事故報告書, 2013. (http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/os_hirase/2013/11/251115-1-4.pdf)
- 2) 小林康裕, 風力発電装置における軸受の最新技術と市場動向, JTEKT Engineering Journal No.1010, 2012.
- 3) 土木学会(2010), ”風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010 年版] ”pp.137-145
- 4) Sho Oh, Field Measurement of The Main Shaft Dynamic Loadings On a Fixed-speed Active Stall Controlled 1MW Wind Turbine, First International Symposium on Flutter and its Application, pp.697-704, 2016.
- 5) Spruce, C. J., & Turner, J. K. (2013). Tower vibration control of active stall wind turbines. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 21(4), 1049–1066.
- 6) Jon Keller, Yi Guo, and Latha Sethuraman, Gearbox Reliability Collaborative Investigation of Gearbox Motion and High-Speed-Shaft Loads, NREL Technical Report TP-50000-65321, 2016