

風力発電設備支持物に作用する発電時の荷重予測と実測による検証

LOAD ESTIMATION OF A WIND TURBINE SUPPORT STRUCTURE DURING OPERATION
AND VALIDATION BY MEASUREMENT山口 敦¹⁾ プラサンティ ウィディヤシ サリ²⁾ 石原 孟³⁾Atsushi YAMAGUCHI¹⁾ Prasanti Widyasih Sarli²⁾ Takeshi ISHIHARA³⁾

ABSTRACT

In this study, numerical simulation for the load estimation on the support structures during the operation of wind turbine was validated by measurement and the load characteristics of the support structure were investigated. Following results were obtained. The simulation shows good agreement with the measurement in terms of fore-aft tower base moment including mean value, standard deviation, maximum value and the power spectrum density. The gain scheduling has to be modelled appropriately for the accurate estimation of fore-aft tower base moment. The fore-aft moment on the tower shows maximum value at rated wind speed at the base of the tower, while at the tower top, the maximum load is observed at the cut-out wind speed. This is because the fore-aft moment is dominated by the thrust force on the rotor at the tower base while dominated by the moment on the rotor at the tower top.

Key Words: Wind turbine support structure, Load estimation during turbine operation, Validation by measurement

1. はじめに

風力発電設備支持物の設計においては、IEC61400-1¹⁾に示す荷重組み合わせ(荷重ケース)に対して照査を行う必要があり、発電時の荷重は最も重要な荷重ケースの一つである。定格風速より高い風速域において風車は発電出力を一定にするためのピッチ制御を行うため、最大風速時に必ずしも最大荷重とはならず、支持構造物の部位により最大荷重となる風速が異なるという特性がある。また、設計時に考慮する発電時最大荷重としては、50年再現期待値を用いることが規定されているが、50年再現期待値を推定するためには、発電時の荷重特性を明らかにする必要がある。

石原、石井²⁾は、風車のスラスト係数に基づき平均モーメントを算出し、経験的に求めたガスト影響係数を用いる手法を提案するとともに、発電時最大荷重の50年再現期待値を推定するための係数を年平均風速と乱れ強度の関数として提案した。また、山本ら³⁾は実機の観測データに基づき、風車運転時のガスト影響係数を求める半経験式を提案した。しかしこれらの手法はロータに作用するスラスト力に基づいて荷重を決定しているため、スラスト力よりもロータに作用するモーメントが重要となるタワー上部へは適用できず、風直角方向の荷重の推定にも用いることはできない。一方、Moriarty⁴⁾は5MW標準風車モデルを用いて荷重シミュレーションを行い、風車タワー基部、ブレード基部、ローターシャフト等の発電時の荷重特性を検討した結果、風方向・風直角方向のタワー基部における荷重特性と風車ロータに作用する荷重特性が全く異なることを示したが、シミュレーションの妥当性について検証が行われていないのに加え、風車タワーの高度別に荷重特性がどのように変化するかについては明らかにされていない。

1) 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 特任講師(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 博士課程

3) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授

本研究では、発電時に支持物に作用する荷重を再現するための風車のモデルを作成し、実測により検証を行う。また、ピッチ制御モデルやロータ重心偏差のモデル化の違いが風車支持物の荷重に与える影響を明らかにするとともに、風車タワー各部に作用する荷重の特性を明らかにする。

2. 風力発電設備の荷重シミュレーションモデル

本研究では、風力発電設備の応答解析ソフトウェア、GH Bladedを用いて図 1 に示す銚子沖風力発電設備を対象として応答解析を行った。本実証研究機では、風車タワー下端から 62.9m、28.6m、0.7m の位置にひずみゲージが設置されており、50Hz で測定が行われている。本研究ではこれらのひずみゲージにより測定されたタワーのモーメントを検証データとして用いた。なお、本実証研究機は洋上風車であるが、重力式基礎上に設置されており、波荷重が風車タワーに与える影響を無視することができることから、固定基礎上に設置された風車として解析し、波荷重は考量していない。

2.1 入力風のモデル化

実証研究機の東方約 300m の地点に高さ 90m の風況観測マストが設置され、海面上 30m～90m の風速が高度 10m おきに計測されている。風車発電時のような低風速領域では、風速の乱れ強度は風速によって変化するため、風車のハブ高さ(海面上 80m)と同じ高度の風速の計測結果から、風速別のビン平均の乱れ強度を求めた(図 2)。一方、IEC61400-1¹⁾では風車設計時に用いる乱れ強度の平均値として(1)式を用いることが規定されている。

$$I_1 = \frac{I_{ref}(0.75U + 3.8)}{U} \quad (1)$$

本研究では、(1)式内の乱れ強度の大きさを示すパラメータ I_{ref} として、7%を用いた。その場合の風速別の乱流強度の値を図 2 にあわせて示すが、実測結果をよく再現していることがわかる。また、乱流風速場を発生させる際には、乱流の長さスケール、スペクトル等に関しては、IEC61400-1 Annex C²⁾に規定されている Kaimal スペクトルを用いた。また、平均風速の鉛直分布としては洋上風力発電設備の設計標準である IEC61400-3³⁾に従い、 $\alpha = 0.15$ のべき則を用いた。さらに、風力発電設備に作用する最大荷重は乱流場により大きな影響を受けるため、各平均風速ごとに 35 種類の異なる乱流シードを用いてそれぞれ 10 分間の解析を行い、35 ケースの最大値の平均値を取ることで、各風速別の最大荷重とした。

2.2 風車のモデル化

GH Bladed では、風車タワーおよびブレードは梁要素を用いてモデル化される。風車タワーについて、断面 2 次モーメント、断面積および質量が実際の筒身と一致するようにモデル化した。また、塔内の踊り場や梯子などの付属物や、フランジは集中質量としてタワー質量に加えた。また、タワーの 1 次および 2 次の構造減衰は実測⁶⁾から求め、3 次の構造減衰はレイリー減衰を仮定して推定した。用いた減衰定数の値を表 1 に示す。

ブレードについては、標準風車モデルを参考に、1 次固有周期が実測と一致するように断面 2 次モーメントを微修

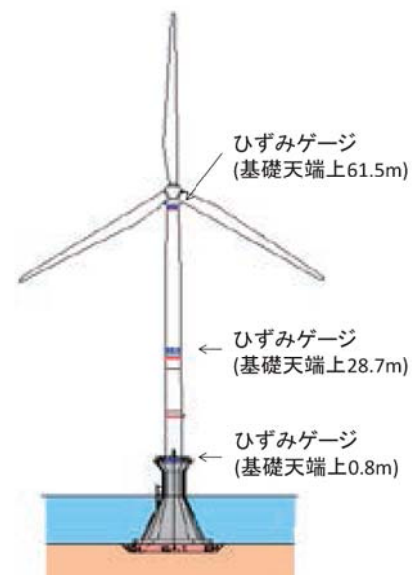


図 1 本研究で対象とした風車

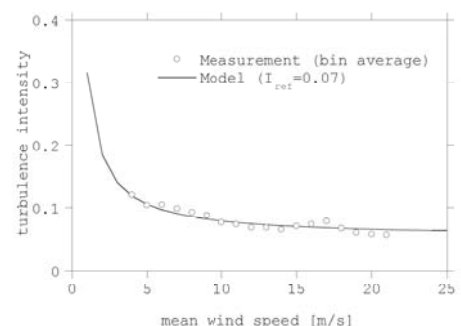


図 2 平均風速別乱れ強度

表 1 本研究で用いたタワーの構造減衰

固有モード	減衰比
1 次	0.2%
2 次	2.5%
3 次	4.2%

正した。ブレードのねじり角，コーン角については実際の風車の値を用いた。また風力発電設備の実際のブレードは，わずかに3枚の重量が異なるため，ロータ重心はロータ軸上にはなく，ロータ回転時に風直角方向の荷重に影響を与える可能性がある。このことを考慮するために，本研究ではロータ軸から離れた位置に仮想的な付加質量を配置し，ロータの重心偏差を考慮することとした。付加質量の重量とロータ軸からの距離は，ロータ全体の重量と重心位置が実機と一致するように設定した。

ピッチ制御とトルク制御のモデルについては，吉田 7)に従った。風ロータ回転数が定格未満の場合，ブレードのピッチ角は0度に固定し，発電機のトルク Q_{Dem} はロータの回転数が最適となるように，(2)式により計算される。

$$\begin{aligned} Q_{\text{Dem}} &= K_{\text{opt}} \Omega_G^2 \\ K_{\text{opt}} &= C \frac{\pi \rho R^5 C_{P\text{Opt}}}{2r^3 \lambda_{\text{Opt}}^3 \eta_M} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで， Ω_G は発電機の現在の回転角速度， R はロータ直径， $C_{P\text{Opt}}$ は最大効率時の出力係数， λ_{Opt} はその際の周速比， r は増速比， η_M は増速機の効率である。また， C はロータのスラスト力を補正するための係数であり，本研究では $C = 0.75$ とした。ロータ回転数が定格に達した後は，発電機のトルク偏差 ΔQ_{Dem} とピッチ角偏差 $\Delta \theta_{\text{Dem}}$ の指令値は(3)式に示すPI制御によって決定する。

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{Dem}} &= K_{QP} y + K_{QI} y_I \\ \Delta \theta_{\text{Dem}} &= \kappa (K_{SP} y + K_{SI} y_I) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで， y および y_I はそれぞれ発電機速度偏差と残差であり，比例ゲイン K_{QP} ， K_{SP} と積分ゲイン K_{QI} ， K_{SI} の値は吉田 7)に従い求めた。ピッチ角制御については，ピッチ角 θ に応じて，(4)式に示すゲインスケジューリングを適用する。

$$\kappa = \min \left(\frac{1}{\frac{\xi}{1/3} + (1 - \xi)}, 1 \right), \quad \xi = \frac{\theta - \theta_{\text{Des}}}{\theta_{\text{Out}} - \theta_{\text{Des}}} \quad (4)$$

ここで， θ_{Out} はカットアウト風速に対応するピッチ角(90度)であり， θ_{Des} は設計ピッチ角(4.5度)である。なお，ゲインスケジューリングが支持物の荷重に与える影響を明らかにするために，ゲインスケジューリングを実施しないケース($\kappa = 1$)についても解析を行った。

3. 実測による検証

前章で構築したモデルを検証するために，銚子沖洋上風力発電設備における実測データを用いて，検証を行った。検証データとしては，風車タワーでひずみゲージにより計測された風車タワーのモーメントに加え，風車メーカーから提供されたパワーカーブおよびス

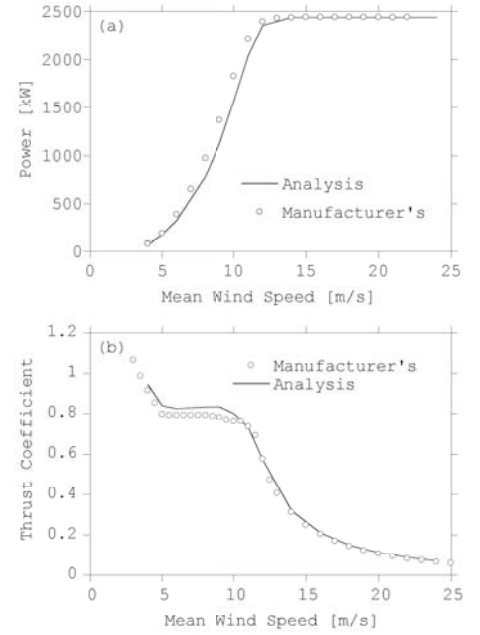


図3 パワーカーブ(a)とスラスト係数(b)のメーカー提供値とシミュレーション結果

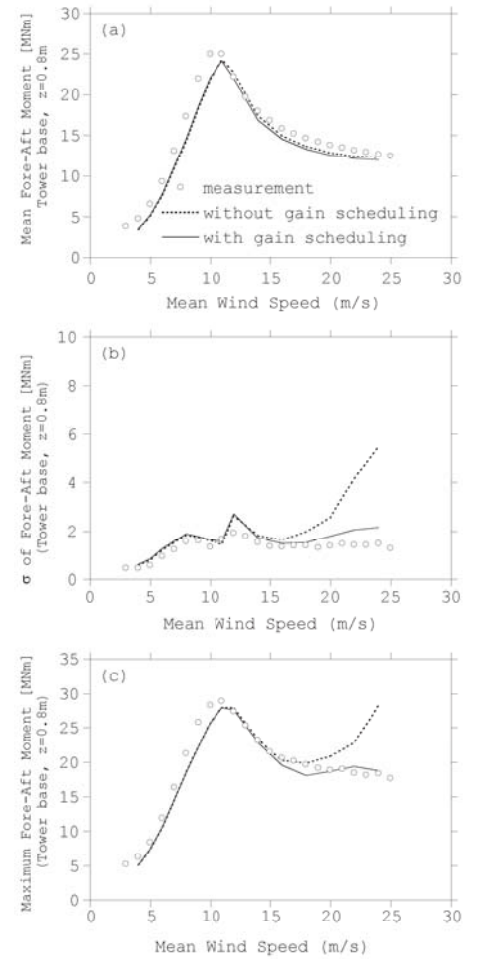


図4 風車タワー基部($z=0.7\text{m}$)における風方向モーメントの(a)平均値，(b)標準偏差，(c)最大値

ラストカーブを用いた。

3.1 パワーカーブおよびスラストカーブ

まず、構築したモデルにおいてロータに作用するスラスト力およびトルクが実際と同様であることを確認するために、風速別の発電出力、スラスト係数をシミュレーションにより求め、メーカーのカatalog値と比較したものを図3に示す。解析結果は実測およびカatalog値とよく一致している。このことから、構築したブレードのモデルおよび制御モデルが実際の風車に作用する荷重を再現していることがわかる。

3.2 タワー基部モーメント

風車タワー設計において最も重要な荷重である風方向のタワー基部モーメントを平均風速別にシミュレーションにより求め、平均値、標準偏差、最大値を実測と比較したものを図4に示す。ピッチ制御のモデルがタワー基部モーメントに与える影響を明らかにするために、ピッチ制御のモデルとしてゲインスケジューリングを利用した場合と利用しない場合についてシミュレーションを実施した。

タワー基部モーメントの最大値は、定格風速付近に見られる。これは、タワー基部モーメントは主に風車ロータに作用するスラスト力に起因しており、風速が定格風速を超えると、ピッチ制御によりロータに作用するスラスト力が減少するためであると考えられる。

平均モーメントについては、制御モデルによらず、ほぼ同じ値を示し、実測値とよく一致しているが、標準偏差および最大値については、ゲインスケジューリングを使用しない場合、荷重を大幅に過大評価していることがわかる。一方、ゲインスケジューリングを使用した場合には、実測値とシミュレーション結果はよく一致している。このことから、ゲインスケジューリングを使用することにより、荷重の変動成分を低減させることができることがわかる。

ゲインスケジューリングが荷重の変動成分に与える影響をより詳細に分析するために、モデルの差が顕著に表れる平均風速23m/s時のタワー基部における風方向モーメントの変動成分のパワースペクトル密度を図5に示す。風車タワーの1次固有周波数である0.36Hz付近でゲインスケジューリングを使用しない場合に、実測値を大幅に過大評価していることがわかる。

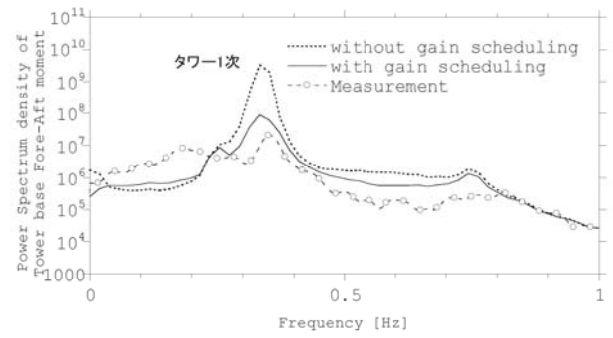


図5 平均風速23m/s時のタワー基部風方向モーメントのパワースペクトル密度

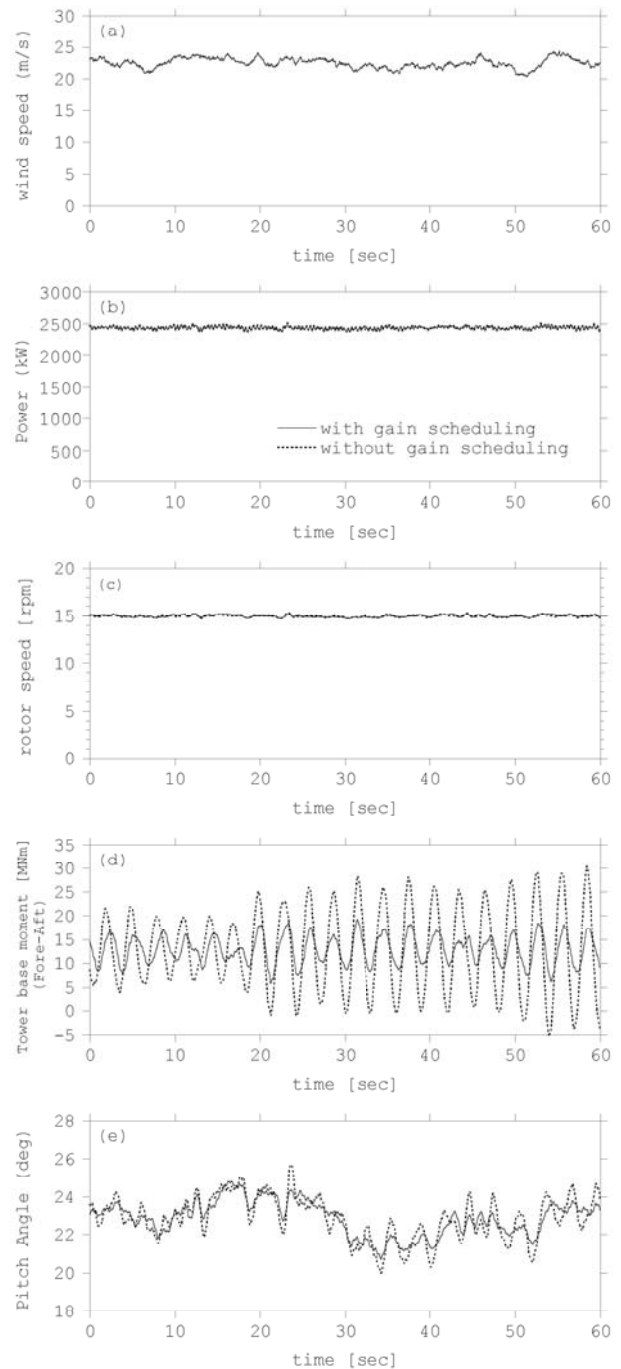


図6 平均風速23m/s時の(a)風速、(b)発電出力、(c)ロータ回転数、(d)タワー基部モーメント、(e)ピッチ角

図 6 には同じく平均風速 23m/s 時の風速とシミュレーション結果の時系列を示す。平均風速 23m/s 時には、ピッチ制御とトルク制御により発電出力とロータ回転数はほぼ一定に保たれている(図 6(b)(c))。一方、ピッチ角の変動に伴い、タワー基部モーメントは大きく変動する。ゲインスケジューリングを使用した場合には、ピッチ制御の速度が抑制され、それに伴い、タワー基部モーメントの変動が抑制されていることがわかる。

3.3 風車タワーに作用する荷重の鉛直特性

風車タワー頂部に作用する荷重は、風車主軸に作用する荷重と似た特性を持ち、タワー基部における荷重特性と大きく異なる。図 7 には高度 66.3m(タワー頂部)、62.9m、28.6m および 0.7m(タワー基部)における風方向の曲げモーメントの最大値のシミュレーション結果を平均風速別に示す。高度 0.7m の結果は前節に示したものと同じものである。また、高度 62.9m から 0.7m に関しては実測値も示す。前節で述べたタワー基部と同様に他の高度でもシミュレーション結果は、実測値をよく再現していることがわかる。

風方向の曲げモーメントは高度が高くなるにつれ値が小さくなるが、平均風速別の分布特性は高度によって異なる。前節で示したようにタワー基部では定格風速時にモーメントの最大値が発生するが、タワー頂部ではカットアウト風速時にモーメントの最大値が発生する。これは、タワー基部と頂部ではモーメントの成因が異なっていることにより説明できる。タワーに作用する曲げモーメントは、風車ロータに作用するスラスト力とモーメントに起因する成分に分けられる。タワー図 8 にはカットアウト風速時の成因別モーメントの最大値をタワーの鉛直高度別に示す。ロータに作用するモーメントはタワーの上から下までそのまま伝わるため高さ別に变化しないが、スラスト力により発生するモーメントは高さの効果が影響するため、タワー基部に近づくにつれ大きな値を示す。このため、風車タワー頂部においては、風車ロータに作用するモーメントが支配的である一方で、風車基部ではスラスト力に起因するモーメントが支配的であると考えられる。風車ロータに作用するモーメントはカットアウト風速時に最大となるが、スラスト力は定格風速付近で最大となるため、風車タワー頂部においては、カットアウト時に荷重が最大となる一方で、風車タワー基部においては定格風速付近で荷重が最大になることがわかる。なお、頂部と基部の間では、両方の間の性質を持ち、計測データのある高度 62.9m 付近で両者がほぼ等しい値となり、高度 62.9m では両者の中間的な性質を持つ。それ以下の高度では、スラスト力に起因するモーメントが支配的となる。このことから、タワーのほとんどの高度ではスラスト力に起因するモーメントが支配的であり定格風速付近で荷重が最大となるが、タワー頂部近傍では、ロータに作用するモーメントが支配的であり、カットアウト風速時に荷重が最大となる。

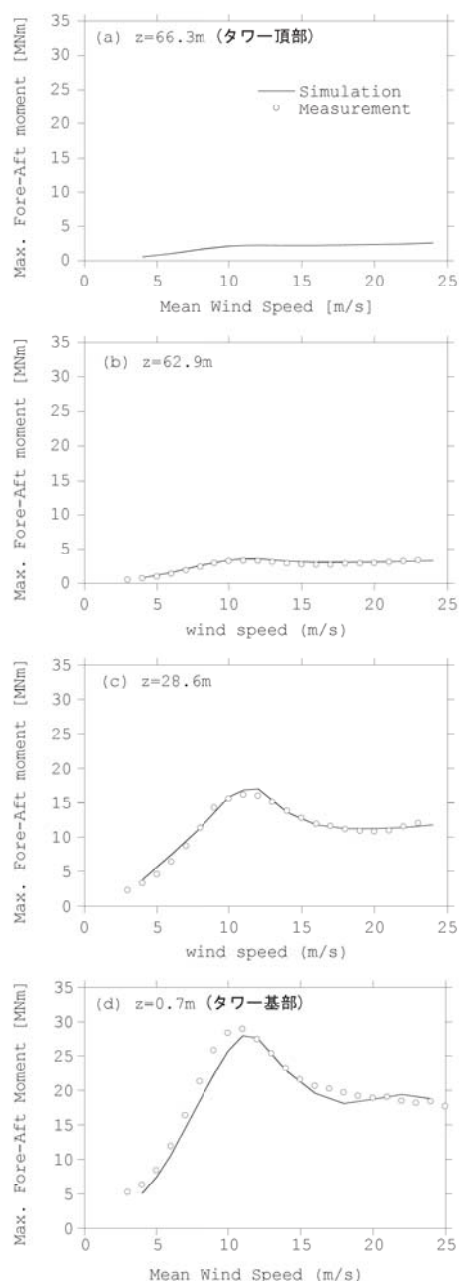


図 7 風車タワー各高度に作用する風方向モーメントの最大値

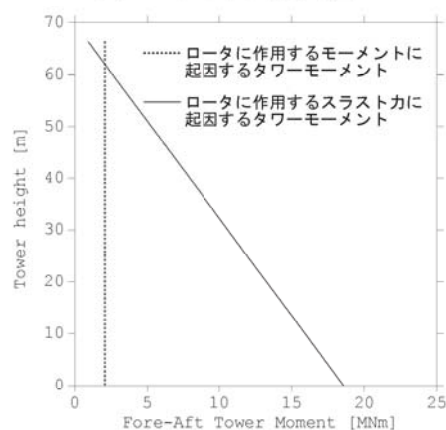


図 8 カットアウト風速時のタワー各高度におけるモーメントの成分

3.4 ロータ重心偏差の影響

風車運転時の風直角方向の荷重はロータの回転に係る。図9には風直角方向のタワー基部モーメントの変動成分のパワースペクトルを示す。2.2 で述べたロータの重心偏差を考慮しなかった場合にはロータの回転に対応する固有周期(1P)のピークを過小評価するが、重心偏差を考慮した場合には、ピークを捉えている。このことから、風直角方向のタワー基部モーメントの予測にはロータ重心偏差を考慮することが必要であることがわかる。

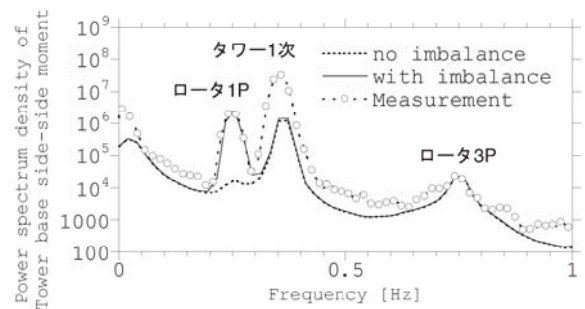


図9 定格風速時の風直角方向タワー基部モーメントのパワースペクトル

4.まとめ

本研究では、銚子沖洋上風力発電設備を対象として、荷重シミュレーションを行い、風車発電時のタワーの荷重特性を明らかにするとともに、実測データを用いて検証を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 風力発電設備の支持構造物に作用する荷重を精度よく再現可能なモデルを構築し、シミュレーションにより求めた風方向のモーメントの平均値、標準偏差、最大値およびモーメントの変動成分のパワースペクトル密度が、風車タワーの各高度において実測値と一致することを示した。
- 2) ピッチ制御のゲインスケジューリングは、風方向のモーメントの平均値には影響を与えないが、最大値には影響を与え、ゲインスケジューリングを行わない場合には、タワーの1次固有周期に起因する変動成分を過大評価し、風方向のモーメントの最大値を過大評価する。
- 3) 風方向のモーメントは、タワーの大部分で定格風速時に最大荷重となるが、タワー頂部ではカットアウト風速時に最大荷重となる。これは、タワー頂部ではカットアウト時に最大荷重となるロータに作用するモーメントが支配的であるのに対し、それ以外の場所では、定格風速時に最大荷重となるロータに作用するスラスト力が支配的であるためである。
- 4) ロータ重心偏差を考慮することにより、風直角方向のタワー基部モーメントにおいて、ロータの回転に関する周期のピークを捉えることができる。

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研究の一部として実施したものである。また、風車観測に当たっては、東京電力(株)および鹿島建設(株)に協力を頂いた。また、風車のモデル化に際しては三菱重工業(株)に協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) IEC61400-1 Edition 3, Wind turbines · Part 1: Design requirements, 2005.
- 2) 石原孟, 石井秀和, 風車タワーに作用する発電時最大風荷重の予測, 第21回風工学シンポジウム論文集, 375-380, 2010.
- 3) 山本学, 近藤宏二, 大熊武司, 風車回転時におけるタワーの風方向最大荷重算定式の構築, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第642号, 1413-1421, 2009.
- 4) P. Moriarty, Database for Validation of Design Load Extrapolation Techniques, *Wind Energy*, 11, 559-576, 2008.
- 5) IEC61400-3 Edition 1, Wind Turbines · Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, 2009.
- 6) 吉田茂雄, 風車支持物の空力弾性シミュレーションのための可変速・ピッチ制御パラメータ, 風力エネルギー, 33, 4, 104-111, 2009.
- 7) 山口敦, 福王翔, 石原孟, 常時微動と強制加振試験に基づく洋上風力発電設備のシステム同定, 第35回風力エネルギー利用シンポジウム, 264-267, 2013.