

実風車における現地観測と風応答解析*

Onsite measurement and wind response analysis

石原 孟** ファバンフック** 高原景滋*** 銘苅壮宏***

Takeshi ISHIHARA** Pham Van PHUC** Keiji TAKAHARA*** Takehiro MEKARU***

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの導入促進により風力発電設備が急速に増えている。我が国の風力発電の設備容量は平成16年度末に94万kWに達し、924基の風車が全国各地に建設され、国内における風力発電産業も形成されつつある。一方、風力発電設備の被害も多く報告され、風車の耐風安全性の向上が緊急の課題となっている¹⁾。

風力発電設備を建設する際には、風車のタワーと基礎に作用する風荷重を厳密に評価する必要がある。しかし、現状では国内において、実風車に関する観測例が少なく、風車の減衰などの構造パラメータについては不明な点が残されている。Subroto(2001)²⁾は5基の600kW風車を対象に、風車タワー頂部の応答加速度を計測し、風車の固有振動数を調べた。その結果、風車の1次固有振動数は風車間の差が小さく、約0.01%であることを明らかにした。この研究ではブレード、ハブ、ナセルをタワー頂部の集中質量としてモデル化し、固有値解析により風車の固有振動数を求め、実測値と比較した。簡略化された風車モデルにより求めた風車の固有振動数は実測値より5%程度大きくなっているが分かった。一方、国内においては、棚田他³⁾は600kWの風車を対象に、タワー頂部の応答加速度を計測し、風車の固有振動数を求めた。その結果、解析から求めた固有振動数と観測値の間に約3%の差が見られた。なお、以上の二つの研究では風車の動解析に必要な風車の構造減衰について詳細な解析が行われていない。

そこで、本研究では、400kW ストール制御の風車を対象に現地観測を実施し、風向・風速、タワー頂部の応答加速度、タワー脚部の動歪みを計測し、応答加速度の観測データから風車の固有振動数、構造減衰を算出すると共に、動歪みからタワー基部における曲げモーメントを求めた。また、風車の多質点モデルを作成し、風応答解析を行うことにより、風車の振動特性を明らかにし、観

測結果と比較することにより、本研究で開発された風応答解析プログラムの精度検証を行った。

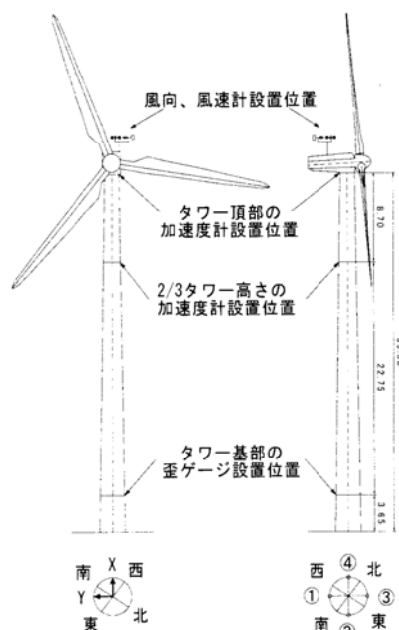


図1 風車の全体図と計測機器の設置位置

2. 現地観測の概要

現地観測は、沖縄電力が所有する400kW ストール制御風車を対象に、2004年1月16日から2004年3月16日までの2ヶ月にわたって実施した。図1には風車の全体図と各計測装置の設置位置を示す。観測項目は風向・風速の他、風車タワーの頂部(35.1m)と2/3の高さ(26.4m)における応答加速度、タワー脚部(3.65m)における動歪みである。風向・風速の観測には、三杯式風速計を使用した。また加速度の計測にはサーボ型加速度計(SS-500)を採用し、それぞれの高さにおいて2台ずつを設置し、ナセル方向(X方向)とナセル直角方向(Y方向)の加速度測定を行った。さらに、風荷重を評価するためにタワーの基部においてはX方向とY方向にそれぞれ2個所に圧縮引張用歪みゲージを設置し、動歪みの計測を行った。データサンプリングは20Hz、10分

* 第27回風力エネルギー利用シンポジウムにて発表

** 東京大学大学院工学系研究科

*** 沖縄電力株式会社、研究開発部

間の時系列データを保存した。三杯式風速計により計測された風速は風車型風向・風速計のそれより1割程度大きいため、本研究では平均風速の補正係数を文献4)に従い、0.9とした。

3. 観測地点の風特性

図2には北風時の乱れ強さの風速による変化を示す。風速が大きくなるにつれ、乱れ強さは0.11に漸近することが分かった。また、二つの変動風速の時系列により求められたパワースペクトルはカルマン型スペクトルとよく一致し、スペクトルから推定された乱流の長さスケールはそれぞれ133mと110mとなっていることが分かった。以上の結果から、本観測地点は建築物荷重指針⁵⁾で定められている粗度区分Ⅰ(海上)に分類できることが分かる。

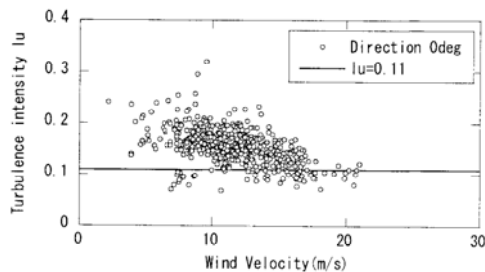


図2 北風の平均風速による乱れ強度

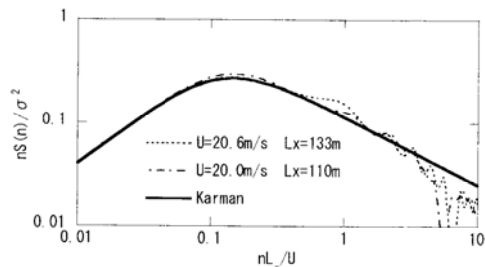


図3 変動風速のパワースペクトル

4. 風車の振動特性

4.1 風車の固有振動数

図4には観測により得られた応答加速度の波形から求めたパワースペクトル密度を示す。この図から、タワー頂部では低い周波数(0.81Hzと2.43Hz)のところにははっきりしたピークが見られ、最も低い周波数0.81Hzのピークはナセル方向とナセル直角方向とほぼ一致し、風車タワーの1次固有振動数に対応していると思われる。一方、タワーの2/3の高さでは低周波数のピークに加え、4.62、5.58、6.42、6.85、7.59Hzのところにも明確なピークが見られた。風車の場合にはブレードとタワーとの連成振動モードが存在し、複雑な振動特性をもっていることが分かる。

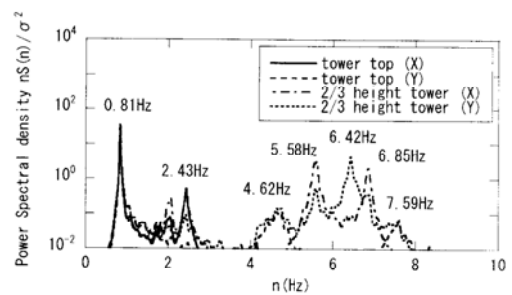


図4 加速度応答のパワースペクトル密度

4.2 風車の減衰

風車の風応答を精度よく評価するためには、風車の構造減衰比を決定する必要がある。本研究ではRD法⁶⁾を採用し、応答加速度から減衰比を同定した。図5にはRD法により求めた減衰比の風速による変化を示す。一般に風車の減衰には構造減衰と空力減衰の二つの成分が含まれ、それぞれの成分に分けることが望ましいが、本研究では風速が低いことや空力減衰の値が小さいことから空力減衰を無視し、風車の構造減衰を求めた。図5から分かるように、風車の減衰比は風速によりバラツキが大きく、はっきりした傾向が見られない。X方向とY方向の減衰比の平均値はそれぞれ約1%、0.6%である。本研究では誘導発電機を採用した風車を対象としたため、ナセル方向の振動がロータシャフトと並列に設定されたギアボックスに伝達され、機械により摩擦が大きく、結果的にはナセル直角方向より大きな減衰が発生したと推測される。本研究では風速が比較的低い日(約6m/s)を選び、人力加振試験を実施し、ナセル方向(X方向)の構造減数が約1%であることを確認した。この値は、文献7に示されて風車のタワー設計に一般的に用いられている構造減衰比0.8%に近いことが分かる。

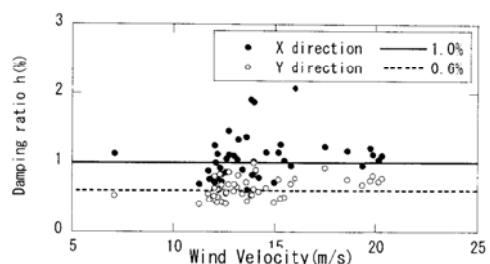


図5 風速による減衰比の変化

5. 風車に作用する風荷重

風車タワーに作用する風荷重を求めるために、計測された動歪みから風車基部に作用する曲げモーメントを求めた。図6にはそれぞれX方向とY方向に作用するタワーの曲げモーメント M_x と M_y の定義を示す。風車基部に

作用する曲げモーメントは式 1、2 により算出した。

$$M_x = EI \times (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) / D \quad (1)$$

$$M_y = EI \times (\varepsilon_4 - \varepsilon_2) / D \quad (2)$$

ここで、 E はヤング率、 I は断面 2 次モーメント、 D はタワー断面の直径、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ and ε_4 は図 1 に示す 1, 2, 3, 4 地点の歪みである。

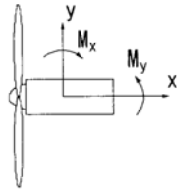


図 6 タワー曲げモーメントの定義

6. 風車の風応答解析

6.1 解析プログラムの概要

風応答解析には、本研究で開発された多質点風応答解析プログラム CASt を使用した。プログラムの概要は表 1 に示す。風車の振動を記述する運動方程式は次式のようになる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (3)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[C]$ は減衰マトリックス、 $[K]$ は要素剛性マトリックス、 $\{F\}$ は空気力による各節点での力ベクトル、 $\{u\}$ は節点変位ベクトルである。

表 1 解析プログラムの概要

数値積分	Newmark- β 法
固有値解析	Subspace Iteration 法
使用要素	Saint-Venant のねじりを考慮する 6 自由度のビーム要素
参照座標系	Total Lagrange 定式化
空気力の評価	準定常理論
構造減衰	Rayleigh 減衰

6.2 固有値解析

風車の固有振動数と振動モードを明らかにするために、ブレードのみのモデル、ブレード、ハブ、ナセルをタワー頂部の集中質量として簡略化したタワーモデル及びブレード、ハブ、ナセル、タワーの構造諸元を正確に評価した風車全体モデルを作成し、固有値解析を行った。表 2 には各モデルの解析結果と観測値を示す。この表から分かるように、観測から得られた 1、2 次また 9、10 次モードはタワーの 1、2 次と 3、4 次モードに対応し、観測の 3、4、5 次モードはブレードの 1 次モードに対応している。また、風車モデルは風車の各部分を詳細に

モデル化したことにより、観測された風車のすべての振動数を精度よく再現することができた。

表 2 固有振動数の観測値と固有値解析結果との比較

No	観測 (Hz)	固有値解析の結果 (Hz)		
		ブレード	タワー	風車全体
1	0.81	2.575	0.854	0.81
2	0.81	6.187	0.854	0.81
3	2.43	-	6.938	2.41
4	2.43	-	6.938	2.53
5	2.43	-	-	2.62
6	4.62	-	-	4.51
7	5.58	-	-	5.26
8	5.58	-	-	5.73
9	6.42	-	-	6.21
10	6.85	-	-	6.35

6.3 風応答解析の結果

本研究で開発された多質点風応答解析プログラムの予測精度を検証するため、風車全体のモデルを用いて、風応答解析を行った。タワーの抗力係数については文献 8 により 0.6 を採用し、ナセルの抗力係数と揚力係数は実験値⁹⁾を採用した。また、ブレードの各断面における抗力と揚力係数は翼厚比 12%¹⁰⁾と 21%¹¹⁾の翼断面の空気力係数から内挿して求めた。X 方向と Y 方向の構造減衰については現地観測から算定された 1.0%と 0.6%を使用した。風車全体に作用する 3 成分の変動風速は文献 12 に従い発生した。ここで、使用した変動風速パワースペクトル型はカルマン型、空間相関のディケイファクターは 8、フェイズは 0 とした。また風直角方向と鉛直方向の乱れ強さ I_v, I_w は、文献 14 に従い、風方向の乱れ強さ I_u の関数として、 $I_v = 0.8I_u$ 、 $I_w = 0.5I_u$ とし、乱流の長さスケールは $L_v = 0.33L_u$ 、 $L_w = 0.08L_u$ を仮定した。なお、平均風速、乱れ強さ、乱流の長さスケールの鉛直分布は文献 5 に定めた粗度区分 I の鉛直分布を採用した。

計算では 0.05 秒刻みを採用し、14000 ステップの解析を行い、過渡応答が含まれる初期の 2000 ステップを除いた 12000 ステップ、すなわち、10 分間の解析結果を整理し、タワー基部での曲げモーメントを求めた。

シミュレーションの結果を評価するために、ハブ高さの平均風速は 5、10、15、20、25、30m/s、乱れ強さは 0.11 での風応答解析を行い、北風の時の観測結果との比較を行った。なお、本研究ではそれぞれの風速に対して 6 つの自然風を発生し、風応答解析を行った¹⁵⁾。図 7、8 に

は解析により得られたタワー基部での曲げモーメントの最大値、平均値、標準偏差と観測値の比較結果を示す。各風速レベルにおいては予測された曲げモーメントの最大値、平均値、標準偏差が観測値とよく一致し、本研究で開発された風応答予測プログラムの有効性が示された。

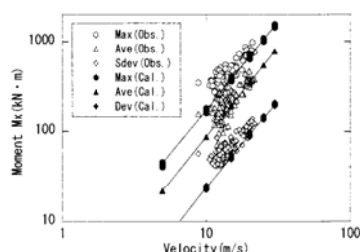


図7 タワー基部におけるX方向の曲げモーメント

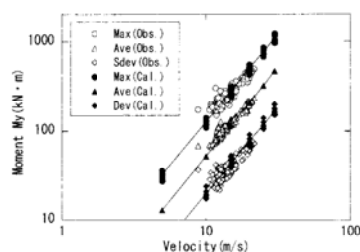


図8 タワー基部におけるY方向の曲げモーメント

7. まとめ

本研究では 400kW ストール制御の風車を対象に現地観測を行い、実風車の固有振動数と減衰特性を明らかにし、観測結果と比較し、以下の結論を得た。

1. 観測された応答加速動からは、低い振動数の 0.81Hz と 2.43Hz はタワーの 1 次とブレードの 1 次固有振動数に対応していることが分かった。
2. 観測された応答加速動から求められたナセル方向とナセル直角方向の構造減衰比はそれぞれ約 1% と 0.6% であることがわかった。
3. 風車の各部分を詳細にモデル化した風車全体のモデルを用い、固有値解析により、観測された風車のすべての振動数を精度よく再現できた。一方、ブレード、ハブ、ナセルをタワー頂部の集中質量として簡略化したタワーモデルを用いる場合に、風車タワーの 1 次固有振動数を約 5% に過大評価した。
4. 風応答解析により求められたタワー基部の曲げモーメントは観測値とよく一致し、本研究で開発された風応答解析の精度を確認できた。

謝辞 本観測の実施にあたり、サンシステムサプライ

(株)岸尚弘氏、清水建設(株)の嶋田健司主任研究員、また風応答解析においては電力中央研究所(財)の清水幹夫主任研究員にご指導及びご助言を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 石原孟: 我が国の風力開発における技術課題と将来展望、電力土木、No.314、pp3-9、2004。
- 2) Subroto, T.H., Speet, L.J.J: Natural Frequency Calculations and Measurements on Wind Energy Converters at 'Irene Vorrink' WindPark, Proc. of the European Wind Energy conf., pp.295-298, 2001。
- 3) 棚邊隆、他: 風力発電設備の動的特性と耐震設計の基礎的考察、NKK 技報、No.177、2002。
- 4) 石原孟、日比一喜、加藤央之、大竹和夫、松井正宏: 日本各地の年最大風速データベースの構築と測器の補正、日本風工学会誌、No.92、pp. 5-54、2002。
- 5) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、2004。
- 6) 勝地弘、他: 常時微動データによる明石海峡大橋の固有振動特性、Vol.50A、pp.637-646、2004。
- 7) Guidelines for Design of Wind Turbines, Wind Energy Dept., Riso National Lab., Denmark, 2001。
- 8) British Standard Institution: Code of basic data for the design of buildings, CP3, Chapter V, Part 2, Wind Loads, 1972。
- 9) Noda, H., Shimada, K., Ishihara, T.: Wind Forces and Peak Wind Pressure Distributions on Wind Turbine Nacelle, APCWE VI, CD-Rom, 2005。
- 10) Generic 2MW Offshore Turbine, GH Bladed Version3.51, Garrad Hassan and Partners Limited, 2001。
- 11) Somers, D.M.: Design and Experimental Results for the S809 Airfoil. NREL/SR-6918. Golden, Colorado, National Renewable Energy Lab., 1997。
- 12) 岩谷祥美: 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション、日本風工学会誌、No.11、pp5-18、1982。
- 13) 橋梁の耐風設計—基準と最近の進歩、土木学会、2003。
- 14) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E.: Wind Energy Handbook, Wiley, England, 2001。
- 15) IEC 61400-1(2003): Wind Turbines-Part 1: Design Requirements, International Electrotechnical Commission. 3rd edition, 2003。