

精緻化されたドライブトレインモデルを利用した風力発電設備の風応答予測

Prediction of Dynamic Response of Wind Turbines Using Updated Drivetrain Model

○石原 孟¹⁾ 新井 進太郎²⁾ 福王 翔²⁾

Takeshi ISHIHARA¹⁾ Shintaro ARAI²⁾ Shou OH²⁾

1. はじめに

空力弾性モデルと SCADA データを用いた風力発電設備の状態監視手法が提案されている¹⁾。この手法では風車各部材の風応答を空力弾性モデルにより求めるため、風車の構造モデルが重要である。従来風車モデルでは、ドライブトレインが低速シャフトと高速シャフトによりモデル化され、シャフトの構造パラメータは加速度の観測データから同定することにより風応答の予測精度の向上を図ってきた。しかし、このような簡易化されたドライブトレインモデルは実際の風車と異なり、また同定された剛性はシャフトの設計図から求めた値と異なるという問題がある。さらに風車タワーの 2 次モードの減衰についてはこれまで研究例がなく、解析では 1 次モードの減衰と同じ値を用いているのが現状である。

そこで、本研究では、実風車のドライブトレインを忠実に再現できる構造モデルを作成し、加速度応答の実測データから求めた振動数とモデルから求めた値と比較することにより、その妥当性を検証する。また作成した新しい風車モデルを用いてシステム同定を行い、2 次モードの減衰を同定する。

2. 解析モデル

2.1 空力弾性モデル

風車の風応答解析には、風車のローター、ドライブトレイン、タワーの連成解析を行うことのできる CASt (Computer-Aided Aerodynamic and Aeroelastic Technology) を用いた。風車に作用する揚力と抗力は式(1)と式(2)により求めた。

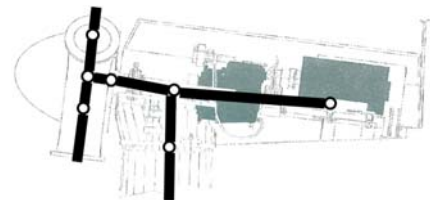
$$F_L = \frac{1}{2} \rho A C_L(\alpha) (u - \dot{x})^2 \quad (1)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D(\alpha) (u - \dot{x})^2 \quad (2)$$

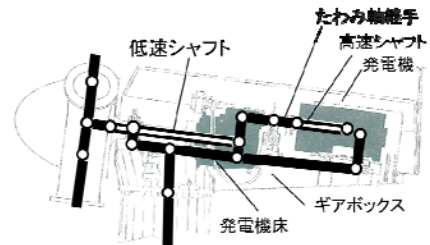
ここで、 ρ は空気密度、 A は平均風速に垂直な構造物に面積、 C_L と C_D はそれぞれ揚力と抗力係数、 α は迎角、 u は風速、 \dot{x} は部材の運動速度である。また入力する風速場としては、WIND3D を用いて作成した。

2.2 ドライブトレインモデルの精緻化

本研究では風車の構造モデルは NEG Micon の 400kW ストール制御風車に基づいて作成した。風車のブレード、ドライブトレイン、タワーは分散質量とビーム要素によりモデル化した。風車のドライブトレイン中には低速シャフト、ギアボックス、高速シャフト、発電機といった様々な部材が存在し、風車の高次モードに大きく寄与する。既往モデルではこの部分を図1(a)に示すように簡略的にモデル化しており、構造パラメータを調整することにより、ドライブトレインの挙動を再現した。本研究では図1(b)のように低速シャフト、ギアボックス、高速シャフト、発電機のみならず、低速シャフトを支えるベアリング、ギアボックスと発電機とつなぐたわみ軸継ぎ手、ナセルの床等の各部材を再現できるように要素を設けた。このモデルは各要素の剛性は基本的に設計図から求めた値をそのまま用い、またドライブトレインのブレーキやたわみ軸継ぎ手が低速シャフトと高速シャフトのねじれ剛性に与える影響も表現できるようになっている。



(a) 従来のドライブトレインモデル (Rigid model)



(b) 精緻化したドライブトレインモデル (Drivetrain model)

図1 風車のドライブトレインのモデル化

本研究では、ドライブトレインのブレーキやたわみ軸継ぎ手の影響を考慮するため、設計図から求めたシャ

1) 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 Professor. The University of Tokyo
2) 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 大学院生 Graduated Student. The University of Tokyo

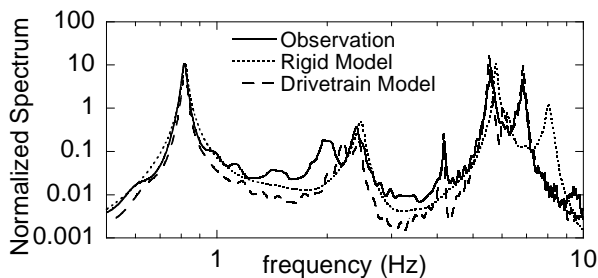
フトのねじれ剛性に、式(3)により定義されるねじれ剛性の修正係数 γ を乗じるによりモデル化した。修正係数 γ は加速度の観測データから同定した。

$$GJ = GJ_{\text{シャフト}} \times \gamma \quad (3)$$

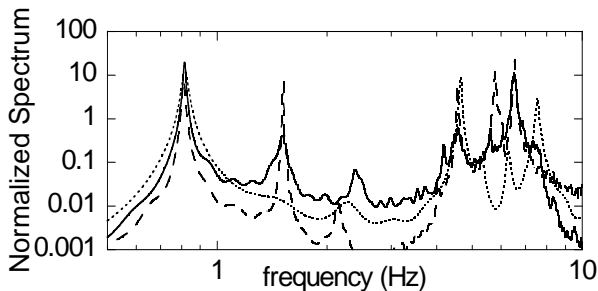
ここで、 G は材料のせん断剛性、 J はねじれ定数である。

3. 観測によるモデルの検証

本研究で作成した新しいドライブトレインモデルを用いて風応答解析を行い、実際の風車から得られた観測データと比較することにより、その検証を行った。対象とする風車は宮古島狩俣に設置されている 400kW ストール制御型風車であり、風車の頂上(35.1m)とタワー2/3 高さ(26.4m)に設置された加速度計のデータを用いた。対象風車および観測の詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。本研究では平均風速が比較的に高かった 2004 年 1 月 21 日 3 時 40 分から 3 時 50 分のデータを用いて検証した。風応答スペクトルは最大エントロピー法(MEM)により求めた。



(a) ナセル軸方向



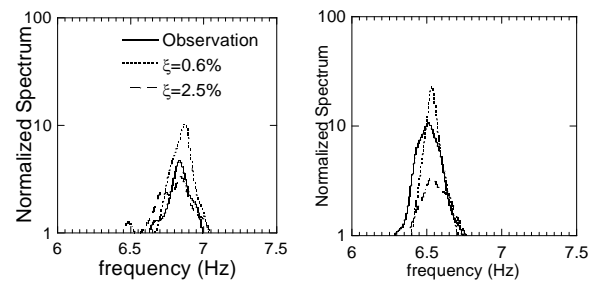
(b) ナセル軸直角方向

図2 風車 2/3 高さにおける加速度応答の比較

図2に風車 2/3 高さにおける加速度応答における予測値と観測値との比較を示す。図2から、従来のドライブトレインモデルで再現できなかったピークを再現できていることがわかる。また低速シャフトのねじれモードに対応する Y 方向 1.6Hz 付近のピークの値はドライブトレインのブレーキの効果による大きくずれたため、 $\gamma = 0.6$ と設定し、観測値とよく一致した結果を得た。ギアボックスと発電機とつなぐたわみ軸継ぎ手の効果についても同様に考慮した。

4. 風車タワーの 2 次モードの減衰の同定

図2に示す加速度応答スペクトルから、高次モードにおける解析値が観測値を大きく上回っていることがわかる。これは、風車タワーの 2 次モードの減衰を 1 次モードと同じ 0.6% と仮定し、レイリーモデルにより、減衰マトリクスを求めたことに起因する。そこで、本研究ではナセル軸方向における高次モードの加速度応答振幅の予測値を観測値と一致するように、風車タワーの 2 次モードの減衰を同定した。その結果、ナセル軸方向の 6.6Hz 付近の応答振幅は図3に示すように、2 次モードの減衰は 1 次モードのその約 4 倍にあたる 2.5% となること分かった。風車タワーの 2 次モードの減衰の値は、最近銚子沖に設置された洋上風車における加振試験から得られた 2 次モードの減衰の値と一致している²⁾。



(a) ナセル軸方向

(b) ナセル軸直角方向

図3 高次モードの加速度応答振幅の比較

5. まとめ

本研究では精緻化されたドライブトレインを利用した風車の風応答予測を行い、以下の結論を得た。

- 1) 実風車のドライブトレインを忠実に再現できる構造モデルを作成し、その妥当性を加速度応答の実測データにより検証した。
- 2) 低速シャフトのねじれによる風応答を再現するため、ブレーキの影響を考慮する必要があることが分かった。
- 3) ナセル軸方向の風車タワーの 2 次モードの減衰を同定した結果、1 次モードの減衰比の約 4 倍にあたる 2.5% となること分かった。

参考文献

- 1) 石原孟, ユン・ジェソン, 福王翔, 「SCADA データと空力弾性モデルを用いた風力発電設備の風応答の予測」, 第 22 回風工学シンポジウム(2012)
- 2) 福王翔, 山口敦, 石原孟, 「アクティブマスダンパーを利用した実風車における加振実験」, 第 68 回土木学会年次学術講演会(2013)