

### 洋上風力発電設備支持物モニタリングデータとFEM解析による振動特性の把握

株式会社 TTES  
電源開発 株式会社

正会員 ○勝山 真規, 菅沼 久忠, 小原 良子  
正会員 川崎 昌三, 吉岡 健

#### 1. はじめに

本稿は、洋上風力発電の導入普及に必要な技術の確立を目指し、北九州市沖海域で NEDO と電源開発株式会社が共同で実施している洋上風力発電システム実証研究の成果の一端を紹介するものである。

洋上風力発電の場合、発電設備支持物は風作用に加えて波浪作用を受けることから、設計段階では両作用による支持物の動的応答特性の把握および疲労設計が重要となる。その設計検証の第一ステップとして実構造物に設置したセンサから得られた計測データを処理し、支持物の固有値と減衰定数を算出した。固有値については、FEM 固有値解析結果との比較も実施した。本稿では、その結果について報告する。

#### 2. 構造物概要およびセンサ設置位置

対象とした構造物および設置した主なセンサ配置図を図 1 に示す。構造物は約 25m のハイブリッド重力式支持構造物(ジャケッ(鋼製)+基礎(コンクリート重力式)), 約 65m のタワー(鋼製)および風車(ナセル, ブレード等)により構成されている。ナセル部はナセル下部のハッチ上に 3 軸加速度計, タワー部は頂部・中央部・底部の 3 高さにそれぞれ 4 箇所(90° 間隔)の電気式ひずみゲージが軸方

向に設置されている。ジャケッ部は主管との接合部 4 箇所および基礎コンクリート近くの 4 本の主管にそれぞれ 4 箇所(90° 間隔)の計 32 個の光ひずみゲージが主管軸方向に設置されている。なお、データのサンプリング周波数はナセル・タワー部で 50Hz, ジャケッ部で 125Hz であった。

#### 3. 解析対象期間および解析手法

解析対象としたデータは、平成 26 年 10 月 13 日の台風 19 号通過時とした。固有値解析は、風車カットアウト後の 14:30~14:40(平均風速 25.8m/s)の 10 分間加速度, ひずみデータを FFT および ERA(Eigensystem Realization Algorithm<sup>1)</sup>)で解析した。減衰定数は、タワー部が自由振動していたと想定される風車カットアウト時の 14:13~14:15(平均風速 23.9m/s)の 2 分間加速度データを利用し、その減衰波形のピークをつなぐ包絡線の指数近似式を用いて算出した。

#### 4. FEM モデル

ジャケッおよび基礎は、主管が CFT 構造であるため今後の検証を見据え、鋼・コンクリートともソリッド要素でモデル化した。タワー部はシェル要素, ナセルおよびブレードはポイント要素として質量および上記解析データ取得時の偏心を考慮した(図 2)。支持条件は基礎コンクリート下面を完全固定とした。

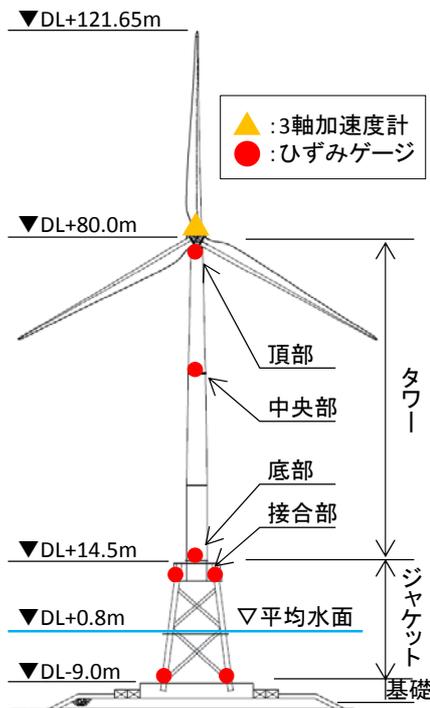


図 1 構造物概要および主なセンサ配置

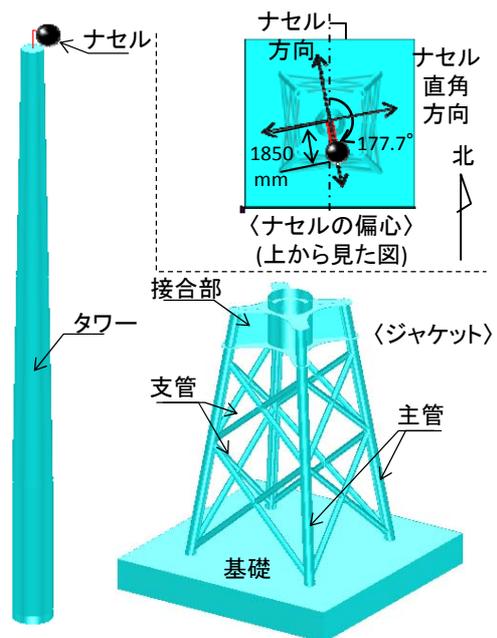


図 2 FEM モデル概要(メッシュ非表示)

キーワード 洋上風力発電, モニタリング, 固有値解析, 減衰定数, FFT, FEM, ERA

連絡先 〒153-0051 東京都目黒区上目黒 3-30-8 (株)TTES TEL:03-5724-4011

5.結果

a) ひずみから算出した固有周波数と FEM の比較

図 3 にタワーひずみを FFT 処理した結果のグラフに FEM 解析結果をプロットした図を示し、図 4 に FEM から得られたモード図を示す。

1 次モードでは FFT と FEM で得られた固有周波数はほぼ一致した。FEM の 2, 3 次近傍では 3 つのピークが確認されたため、ナセルの偏心による方向別応答特性を比較した。FFT 処理ではタワー中央部 4 点のひずみデータから各方向における固有周波数のパワーを抽出し、FEM では 2, 3 次モードの当該ひずみゲージ貼付位置のひずみを抽出し最大値を 1 として正規化した(図 5)。FEM 2 次の 2.47Hz と FFT で値が近かったのは 2.59Hz であったが、卓越方向は逆方向となった。これに対し、FFT の 2.92Hz では値は異なるものの卓越方向は FEM と同傾向であった。FEM 3 次の 3.29Hz は FFT の 3.45Hz と値と卓越方向が一致した。

上記結果に ERA 処理値を併記した一覧表を表 2

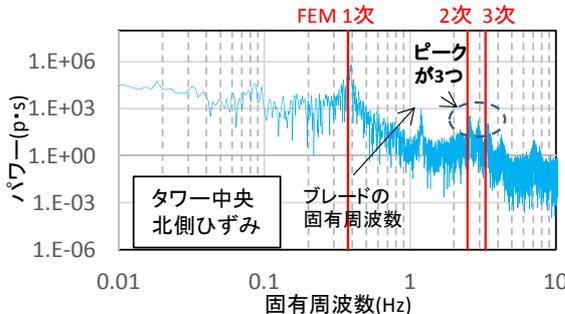


図 3 タワーひずみ FFT 結果と FEM 解析結果

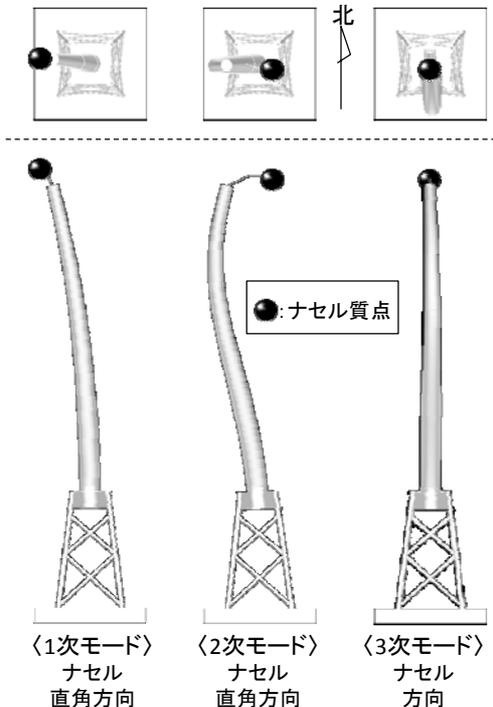


図 4 FEM 解析結果(モード図)

参考文献: 1) 長山 智則, 阿部 雅人, 藤野 陽三, 池田 憲二: "常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解", 土木学会論文集 No.745/I-65, 155-169, 2003.10, 2) Pham Van Phuc, 石原 孟, 藤野 陽三, 福本 幸成: "実風車における現地観測とその振動特性に関する一考察", 土木学会第 60 回年次学術講演会, 1-320, 2009.9

に示す。タワー部では FFT, ERA の値が精度よく一致した。ジャケット部において、FFT ではひずみ値が小さかったことから、ほとんどのセンサで 2 次モード以降のピークが確認されなかったが、ERA においては 4 箇所センサの相関を取ることでタワー部と同様の固有周波数が得られた。

b) 減衰定数の算出

減衰定数算出時の加速度波形を図 6 に示す。ナセル方向は 0.8%, ナセル直角方向は 1.3% であり、設計時の 0.5% を上回った。ナセル直角方向の減衰定数が増加した理由は、空力減衰比等が増大した可能性が挙げられる<sup>2)</sup>。

6.今後の予定

今後は、まず得られた加速度データを FEM モデルに入力して設計値と比較して動的応答特性を把握し、続いて疲労ダメージ等を算出する予定である。

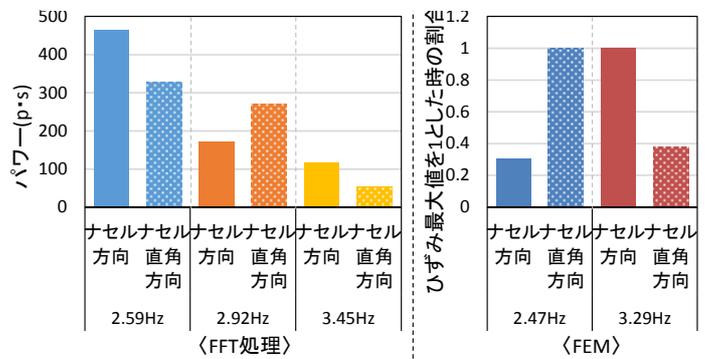


図 5 方向別応答特性の相違

表 2 ひずみから得られた固有周波数一覧表(Hz)

	FFT		ERA		FEM
	タワー	ジャケット	タワー	ジャケット	
1次	0.38	0.39	0.38	0.39	0.37
2次	2.59 or 2.92	* 明確な ピーク確 認不可	2.58 or 2.93	2.57 or 2.92	2.47
3次	3.45		3.43	3.42	3.29

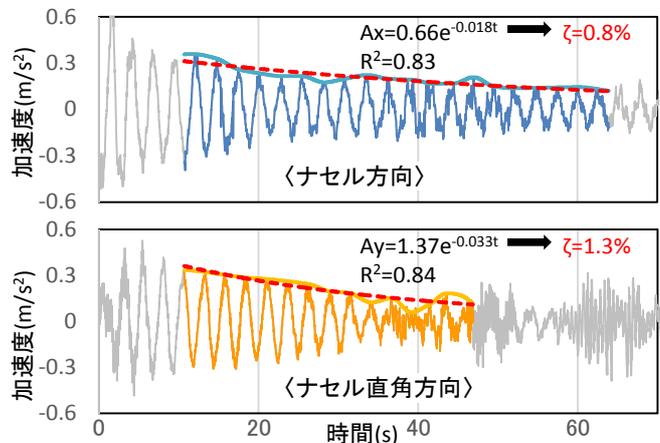


図 6 加速度波形からの減衰定数算出