

風の乱れおよび浮体の動揺が風車の疲労強度に及ぼす影響に関する研究

その3 浮体動揺による影響の評価

○	東京電力	正会員	高橋 孝介
	東京大学	正会員	石原 孟
	東京電力	正会員	助川 博之
	東京大学	フェロー	藤野 陽三

1. はじめに

本研究その3では、浮体の動揺、風の乱れにより発生する変動荷重が、風車の疲労寿命に与える影響について検討を行う。

2. 疲労寿命の概要

浮体式洋上風車の疲労について検討した既存の研究として A. R. Henderson¹⁾、鈴木ら²⁾によって行われたものが挙げられる。Henderson はセミサブ型浮体、鈴木らはスパー型浮体に着目し、浮体動揺を受ける風車の疲労荷重評価を行ったが、どちらも風の乱れ強度については考慮していない。これは、自然風の乱れによる荷重変動成分は、浮体動揺によるものと比べ、無視できるほど小さなものであるという仮定に基づいているが、本研究その2で示したように、風の乱れ強度は風車の疲労強度に大きな影響を及ぼすことが判明している。本研究その3では、風の乱れおよび浮体動揺の両方を考慮した解析を行い疲労寿命を評価する。

3. 疲労等価荷重による浮体動揺による影響解析

本研究で対象とした浮体は、セミサブ型浮体³⁾とし、動揺は、加速度を外力としてタワー基部に加えて評価を行った。なお、考慮する浮体動揺成分は風方向と風直角方向の水平成分とした。例として図1に風速12m/sの時の2成分の時刻歴浮体動揺加速度を示す。

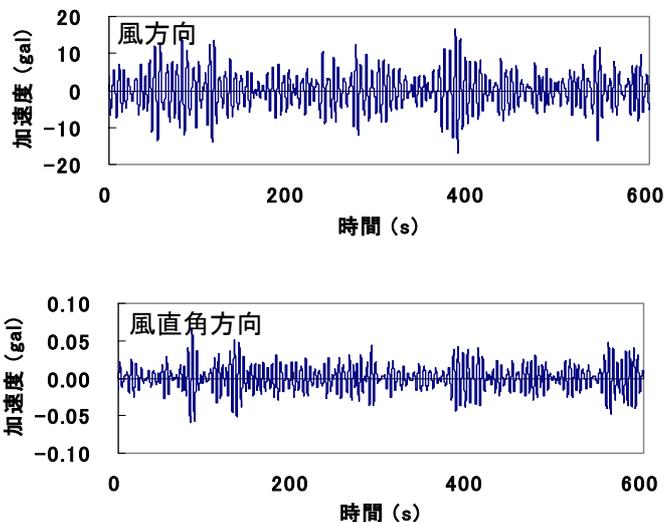


図1 風速12m/sにおける浮体動揺加速度

まず、浮体動揺の影響に注目するため、乱れ強度は0とした風で検討を行った。風の平均風速分布は平均風速8.5m/sのレイリー分布を仮定した。

本研究その2で検討した手順と同じように、疲労等価荷重(DEFLL)により、動揺が有る場合、無い場合のタワー基部、翼根元部の疲労の相対的な比較を行った。計算結果を図2に示す。なお、図の疲労等価荷重は、浮体動揺がない場合の疲労等価荷重で無次元化したものである。

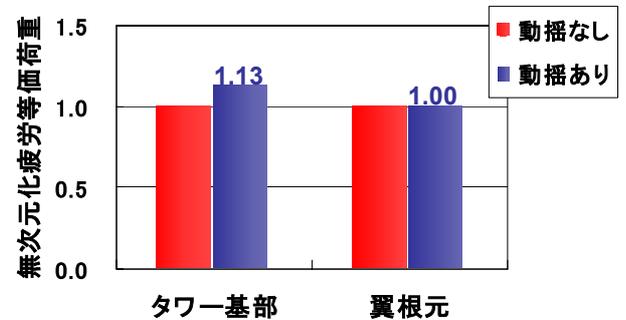


図2 浮体動揺が及ぼす影響

この結果から、浮体動揺は、翼根元の疲労等価荷重にはほとんど影響を与えないが、タワー基部では若干増大していることが分かる。これは、浮体動揺時にタワー基部に作用する転倒モーメントはタワー自身の質量の他、ロータ及びナセルの質量による寄与も加わることによるものと考えられる。一方、翼根元にかかるモーメントは翼自身の質量のみによるもので、タワー基部に比べ、浮体動揺による影響が相対的に小さいためと考えられる。

4. 疲労寿命解析

風の乱れと浮体動揺を同時に受ける場合の、タワー基部における疲労寿命を求める。

以下に疲労寿命算出手順を示す。

- ①外力である風車の流入風、浮体動揺加速度を作成し、
- ②風車各箇所における荷重の時系列変化を求める。
- ③このデータを断面係数で除して、応力時系列変化データに変換し、
- ④レインフロー法を用いて、荷重と繰り返し数について整理する。
- ⑤マイナー則を用いて、各応力範囲の疲労損傷度を算出し、
- ⑥すべての応力範囲

の疲労損傷度を累積した累積疲労損傷度を求め、⑦供用期間を累積疲労損傷度で除して疲労寿命を算出する。

① 外力である風は、平均風速分布は平均風速 8.5m/s のレイリー分布を仮定し、乱れ強度は国際基準である IEC 規格に定められたクラス C(洋上風)とした。風速ケースは本研究その 2 と同様の 11 ケースとし、風速に併せて浮体動揺加速度も時刻歴変化として算出した。② これらの外力を入力データとして、浮体動揺による影響が大きい風車タワー基部における荷重時系列変化を求めた。例として風速 12m/s の時のものを示す。

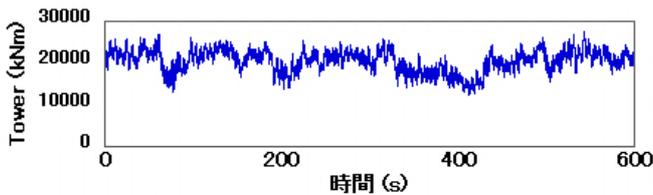


図3 風速 12m/s 時のタワー基部
転倒モーメントの時系列変化

③ この荷重時系列データを応力に変換する。タワー基部の転倒モーメントから応力を算出する式を式(1)に示す。

$$\sigma = \frac{M}{I} \times \frac{y}{2} \quad (1)$$

ここで、M はタワー基部の曲げモーメント、I はタワー基部の断面 2 次モーメント、y はタワー基部の断面直径である。④ このデータをレインフロー法を用いて、応力振幅 F_i と繰り返し回数 n_i について整理して、等価応力を求めた。⑤ これをマイナー則を用いて、各応力範囲の疲労損傷度 D を算出した。ここで、マイナー則とは、あるレベルの応力範囲 s_i が n_i 回作用した時に生じる疲労損傷度 D_i を、 s_i が作用した時の疲労寿命回数 N_i との比($D_i = n_i/N_i$)で与えたものである。⑥ この D_i の総和 ΣD が累積疲労損傷度となる。⑦ そして供用期間をこの ΣD で除したものが、疲労寿命となる。式(2)~(4)に、応力から疲労寿命を求めるまでの式を示す。

$$D_j = \sum_i D_{s_i}^j = \sum_i \frac{n_{s_i}^j}{N_{s_i}} = \sum_i \frac{n_{s_i}^j S_i^m}{a} \quad (2)$$

$$D = \frac{T_L}{T_S} \sum_i \beta_j D_j = \frac{T_L}{T_S} \sum_i \beta_j \sum_i \frac{n_{s_i}^j S_i^m}{a} \quad (3)$$

$$Y = \frac{T_L}{D} \quad (4)$$

ここで、 n_{s_i} は、レインフロー法による応力範囲 S_i の繰り返し回数、 N_{s_i} は、S-N 曲線 $S_i^m N_{s_i} = a$ (m :傾きを表す係数、 $\log a$: $\log N$ 軸における切片)における応力範囲 S_i に対する許容繰り返し回数、 T_L は、供用期間、 T_S は、シミュレーション時間、 β_j は、荷重ケース J の時間比(出現時間)、 Y は、疲労寿命を表す。

5. 解析結果

図 4 に、浮体の最大加速度と疲労損傷度に対する乱れと浮体動揺の寄与割合を示す。浮体の最大加速度は風速によって変化するため、本研究では風速 12m/s 時の値を代表値として用いた。動揺加速度が大きな浮体を用いた場合には、疲労損傷度に対する動揺の寄与率が增大することがわかる。今回検討したセミサブ浮体については、代表的な最大加速度が 15Gal で、疲労損傷度に対する浮体動揺の寄与はほとんどないことが分かった。また、代表的な最大加速度が 60Gal を超える場合に、はじめて浮体動揺の寄与率が洋上風の乱れの寄与率を上回る結果となった。

図 5 に、陸上用に設計された風車を浮体に搭載した場合の、疲労寿命と浮体動揺との関係を示す。疲労寿命は浮体動揺が大きくなるにつれ短くなるが、今回のセミサブ浮体を用いる場合には、代表的な最大加速度が 15Gal、疲労寿命は 126 年となり、陸上風車の設計疲労寿命である 20 年に比べ、かなり長いものとなる。従って、今回想定した浮体を用いる場合には、陸上風車をそのまま浮体に搭載してもよいという結果となった。また、陸上風車の疲労寿命 20 年になる浮体の限界加速度は 40Gal であった。

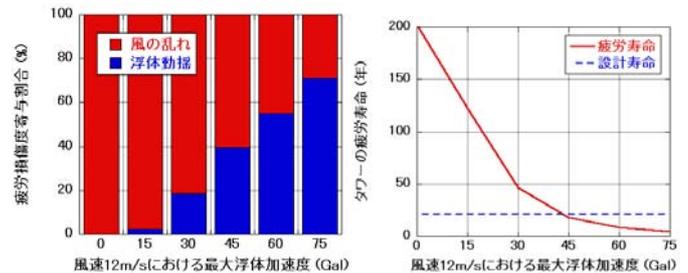


図4 疲労損傷度寄与割合 図5 浮体動揺量とタ-寿命

6. まとめ

浮体の動揺および洋上風の乱れにより発生する変動荷重が、風車の疲労寿命に与える影響について評価すれば、浮体式洋上風力発電システムにおける風車の選定基準を定量的に評価することができ、風車が許容できる浮体の限界加速度を定量的に評価することにより、浮体の最適化も可能になる。

参考文献

- 1) A. R. Henderson : Analysis Tool For Large Floating Offshore Wind Farms 2000
- 2) 佐藤頭, 鈴木英之「浮体式洋上風車の強度設計に及ぼす浮体動揺の影響に関する研究」第 28 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2006.11
- 3) 石原孟, ファハソック, 助川博之「浮体式洋上風力発電に関する研究その 2 軽量セミサブ型浮体の開発」第 28 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2006.11