

浮体動揺と風の乱れが風車の疲労強度に及ぼす影響 に関する研究*

Effects of floater motion and turbulence on fatigue loading of a wind turbine

石原 孟**
Takeshi ISHIHARA

助川 博之**
Hiroyuki SUKEGAWA

高橋 孝介***
Kosuke TAKAHASHI

1. はじめに

現在ヨーロッパを中心に洋上風力発電が急速に普及しはじめている。日本においても陸上での適地不足から洋上風力発電が注目されている。ヨーロッパと異なり、日本近海では沖合に行くにつれ水深が急激に増大するため、着床式洋上風力を開発できる地域が限られており、浮体式洋上風力の開発が不可欠である。陸上風力に比べ、洋上の乱れが小さいという利点がある一方、浮体上に設置される風車が浮体動揺による変動荷重を受ける。浮体式洋上風車の疲労寿命を考える上で、洋上風の乱れおよび浮体の動揺を考慮した評価が必要となる。

浮体式洋上風車の疲労を検討した既存の研究としては A. R. Henderson¹⁾、鈴木ら²⁾の研究が挙げられる。Henderson はセミサブ型浮体、鈴木らはスパーク型浮体に着目し、浮体動揺を受ける風車の疲労荷重評価を行ったが、いずれの場合も洋上風の乱れを考慮していない。これは、洋上風の乱れによる荷重変動成分は、浮体動揺によるものに比べ、無視できるという仮定に基づいているものによる。本研究では、風の乱れと浮体動揺を同時に考慮した解析を行い、風の乱れおよび浮体動揺が風車の疲労荷重に与える影響を調べると共に、浮体式洋上風車の選定基準を明らかにする。

2. 疲労等価荷重の評価

構造物の疲労荷重を評価するには、疲労等価荷重がよく用いられている。この方法では疲労寿命を求めることが出来ないが、外部条件が異なる場合の相対比較を行うことができるという利点がある。

疲労等価荷重の算出は以下に示す手順で行う。①まず外力である風車への流入風を作成し、②そして風車各箇所に生じる荷重の時系列データを求める。③最後にこの時系列データに対してレインフロー法を用いて、荷重の変動幅と繰返し回数について整理すると共に、材料の疲労特性を表す S-N 曲線の傾きを求め、疲労等価荷重を計算する。

2.1 変動風の作成

風車発電時の平均風速は 3m/s～25m/s の範囲にあり、この範囲を風速幅 2m/s ずつに区切って計 11 風速階級に分けることができる。各々の風速階級における風速の発生頻度は、IEC³⁾クラスで規定されたレイリー分布から式(1)により求めることができる。図 1 には年平均風速 8.5m/s のレイリー分布を示す。

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで、 v は代表風速、 $\bar{v}$ は年平均風速である。

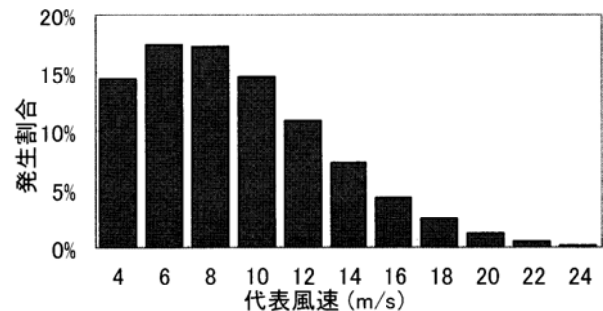


図 1 風速発生割合

図 2 には陸上を想定した IEC のクラス IIA、洋上を想定したクラス IIC および乱れゼロの 3 ケースの乱れ強度を示す。乱れ強度の風速による変化は式(2)により求めた。

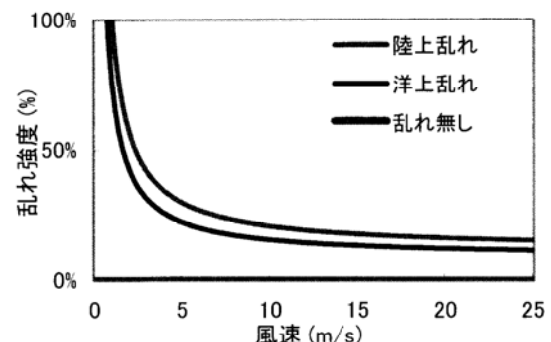


図 2 風の乱れ強度

$$I = \frac{I_{ref} (0.75V_{hub} + 5.6)}{V_{hub}} \quad (2)$$

ここで、 I は乱れ強度、 I_{ref} は代表乱れ強度 (陸上 0.16、洋上 0.12、乱れ無し 0)、 V_{hub} は風車ハブ高さの風速で

* 第 29 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員、*** 非会員 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16

ある．これより外力の検討ケースは，風速 11 ケース，風の乱れ 3 ケースの計 33 ケースとなる．図 3 には陸上および洋上の平均風速 12m/s の時の風速の時系列データの一例を示す．

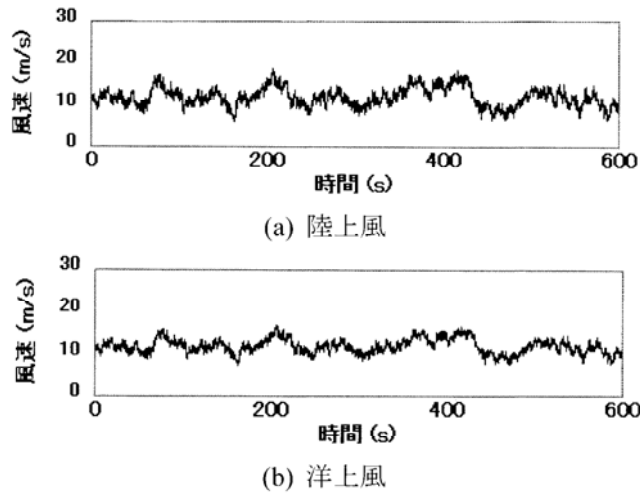


図 3 平均風速 12m/s の時の風速の時系列

2.2 変動荷重の算定

この風速を入力データとし風車の動解析を行い，風車タワー基部および風車翼根元の 2 箇所における曲げモーメントの時系列を求めた．図 4 にはタワー基部の曲げモーメントの時系列変化を示す．各ケースの解析時間は 10 分間とした．

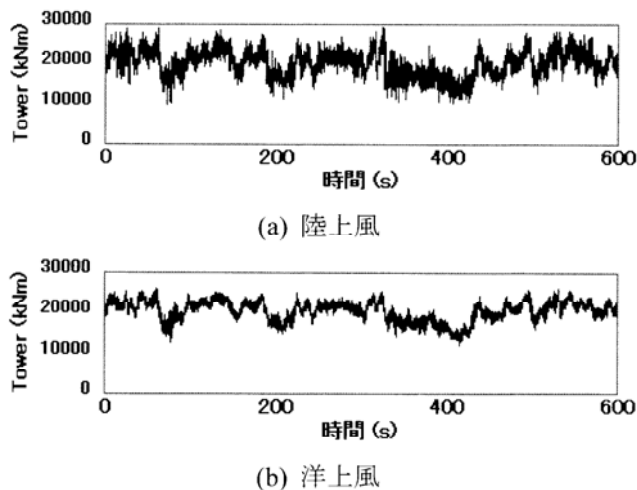


図 4 タワー基部の曲げモーメントの時系列変化

2.3 浮体動揺加速度の算定

本研究で対象とした浮体は，セミサブ型浮体⁴⁾とし，動揺の影響は，浮体動揺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，加えた浮体動揺成分は風方向と風直角方向の水平成分とした．図 5 に風速 12m/s の時の 2 成分の浮体動揺加速度の時刻歴を示す．

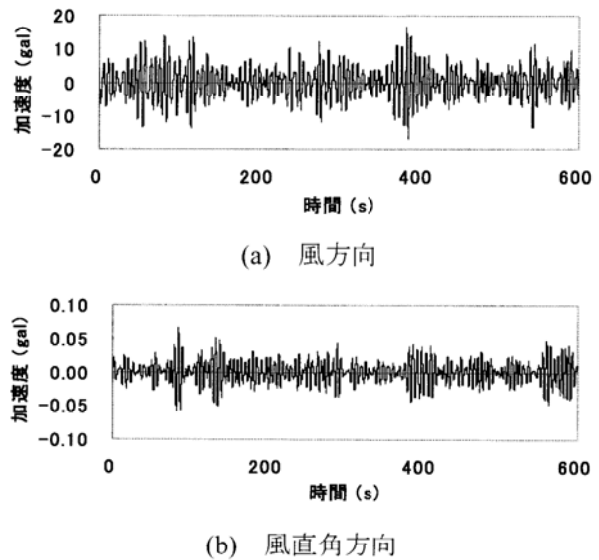


図 5 風速 12m/s における浮体動揺加速度

2.4 疲労等価荷重の評価

上記の荷重の時系列データを，レインフロー法⁵⁾を用いて荷重振幅 F_i と繰り返し回数 n_i について整理し，図 1 に示す風速の発生頻度を重みとして合成し，疲労等価荷重(DEFLL : Damage Equivalent Fatigue Load)を式(3)により求めた．

$$DEFLL = \sqrt[m]{\frac{\sum_i F_i^m n_i}{N}} \quad (3)$$

ここで， F_i は荷重振幅， n_i は風速の発生頻度を考慮した繰り返し回数， m は材料 $S-N$ 曲線の傾き， N は風車供用期間のロータ回転数を表す．なお，疲労等価荷重を求める箇所の材料は，風車翼は GFRP，タワーは鋼材である． $S-N$ 曲線は DNV⁶⁾ で定められた式より求めた．本研究では，タワー基部の m 値は 4(鋼材)，風車翼根元の m 値は 10(GFRP)とした．

2.5 疲労等価荷重の解析結果

疲労荷重を検討する際には，発電時，パーキング，起動，通常停止，停電時の 5 つの荷重ケースについて IEC に規定された条件で検討することとなっている．詳細な疲労検討を行う際には，これらのすべてのケースを考慮すべきであるが，各荷重ケースの疲労損傷度への寄与割合を調べた結果，タワー基部では発電時の割合が 98.4%を占めていることが分かった．そこで，本研究では，発電時の疲労のみを評価することとした．

図 6 にはタワー基部および風車翼根元における疲労等価荷重を洋上風の乱れのケースで無次元化した結果を示す．どの箇所においても風の乱れによる影響が

大きいことが分かる。また洋上風の乱れによる疲労等価荷重は、陸上に比べ、タワー基部において40%程度、翼根元において20%程度小さくなっており、洋上風力発電の有用性が確認できた。また、乱れを考慮しない場合では、疲労等価荷重が過小評価される結果となった。この傾向は特にタワー基部において顕著であり、また翼根元では乱れない場合でもウィンドシアにより大きな疲労等価荷重が発生することが分かった。

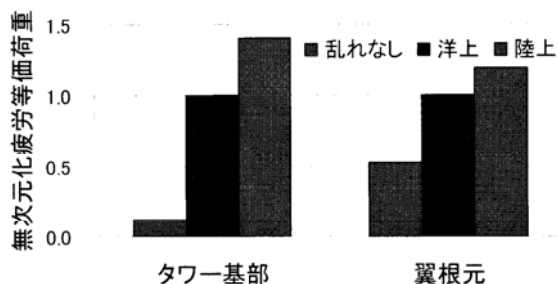


図6 無次元化疲労等価荷重

浮体動揺のみの効果を調べるため、乱れ強度を0として検討を行った。平均風速分布は年平均風速8.5m/sのレイリー分布に従うと仮定した。

図7には浮体動揺が有る場合と無い場合のタワー基部、翼根元の疲労等価荷重を示す。図中の疲労等価荷重は、浮体動揺がない場合の疲労等価荷重で無次元化した。この図から、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のに対して、タワー基部では疲労等価荷重が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曲げ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分も加わることに由来す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。

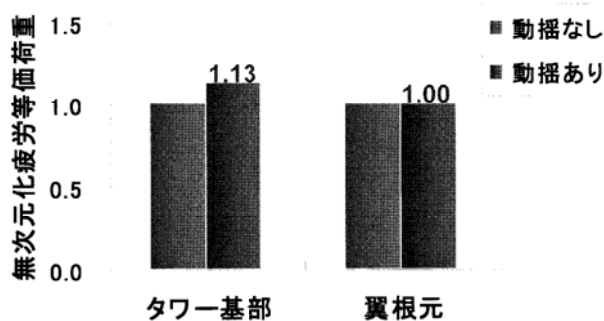


図7 浮体動揺が及ぼす影響

3. 疲労寿命の評価

3.1 疲労寿命評価の概要

風の乱れと浮体動揺を同時に受ける場合のタワー基部の疲労寿命は以下に示す手順で求められる。①外力である洋上風および浮体動揺加速度の時系列データを作成し、②応答解析により風車各箇所が生じる荷重の時系列データを求める。③この時系列データを断面係数で除して、応力の時系列データに変換し、④レインフロー法を用いて、変動応力と繰返し回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、第2章と同様に平均風速分布は年平均風速8.5m/sのレイリー分布に従うと仮定し、乱れ強度は国際基準であるIEC規格に定められたクラスIIC(洋上風)とした。風速階級は第2章と同様の11階級とした。風速の時系列データに併せて浮体動揺加速度の時系列データも用いた。② これらの外力を入力データとして、風車タワー基部における曲げモーメントの時系列データを求めた。図8には風速12m/sの時のタワー基部の曲げモーメントの時系列データを示す。

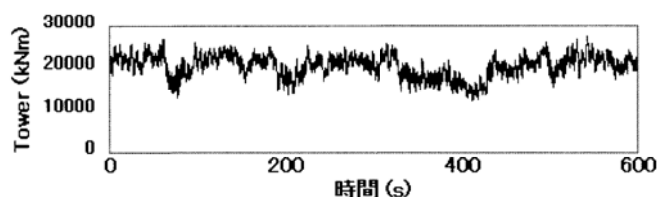


図8 タワー基部曲げモーメントの時系列

③ この曲げモーメントの時系列データを応力の時系列データに変換するため、タワー基部の曲げモーメントから式(1)により応力を算出した。

$$\sigma = \frac{M}{I} \times R \quad (4)$$

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、 R はタワー基部の断面半径である。④ このデータについてレインフロー法を用いて、応力振幅 S_i と繰返し回数 n_{S_i} について整理し、⑤ マイナー則を用いて、式(5)により荷重ケース j の各応力範囲の疲労損傷度 $D_{S_i}^j$ を算出し、また各荷重ケースの総和として D_i をもとめた。ここで、疲労損傷度 $D_{S_i}^j$ は S_i^j が作用した時の疲労寿命回数 N_{S_i} との比($D_{S_i}^j = n_{S_i}^j / N_{S_i}$)で与えたものである。⑥ D_i の総和が累積疲労損傷度 D となる(式(6))。⑦ 最後に供用期間を D で除することにより疲労寿命を求めた(式(7))。

$$D_j = \sum_i D_s^j = \sum_i \frac{n_s^j}{N_s} = \sum_i \frac{n_s^j S_i^m}{a} \quad (5)$$

$$D = \frac{T_L}{T_S} \sum_i \beta_j D_j = \frac{T_L}{T_S} \sum_i \beta_j \sum_i \frac{n_s^j S_i^m}{a} \quad (6)$$

$$Y = \frac{T_L}{D} \quad (7)$$

ここで、 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。

3.2 疲労寿命評価の結果

図 9 には、浮体の最大加速度と疲労損傷度に対する風の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の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る。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ことが分かった。

図 10 には、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、今回想定した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っている。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が 20 年になる浮体の限界加速度は 40Gal であることも図 10 から推定された。

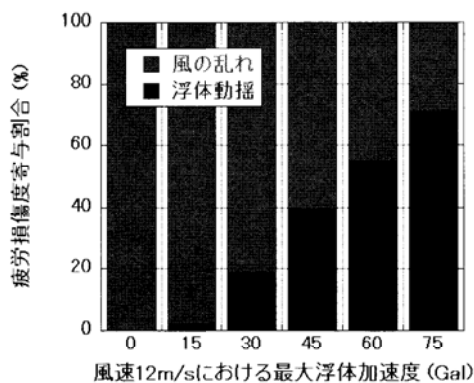


図 9 疲労損傷度寄与割合

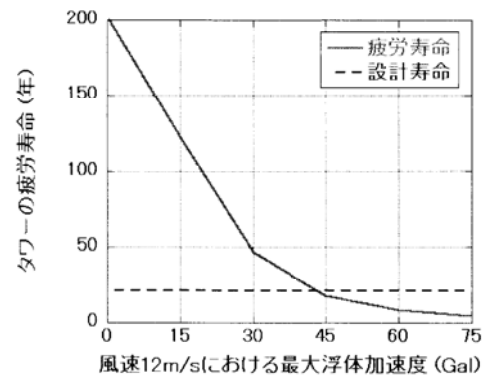


図 10 浮体動揺量とタワーの寿命との関係

4. まとめ

浮体動揺および風の乱れが風車の疲労に与える影響を浮体および風車の時刻歴応答解析により明らかにし、以下の結論を得た。

- 1) 洋上風の乱れは風車の疲労に大きな影響を与えることが分かった。洋上風の乱れを無視したことにより、タワー基部の疲労荷重が大幅に過小評価されるが、風車翼根元ではその影響が小さい。
- 2) 浮体動揺は、翼根元の疲労等価荷重にほとんど影響を与えないが、タワー基部では 13% 程度増大していることが分かった。
- 3) 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を定量的に評価し、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ことや陸上風車の疲労寿命が 20 年になる浮体の限界加速度は 40Gal であることが分かった。

参考文献

- 1) Henderson: Analysis Tool for Large Floating Offshore Wind Farms, 2000.
- 2) 佐藤顕, 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.
- 3) IEC 61400-1: WIND TURBINES, Part 1, Design requirements, Third edition, 2005
- 4) 石原孟, ファパンツク, 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.
- 5) 遠藤達雄, 他: Rain Flow Method の提案とその応用. 九州工大研究報告 (工学), No.28, 1974
- 6) DET NORSKE VERITAS AS: Offshore Standard. DNV-OS-J101, 2004