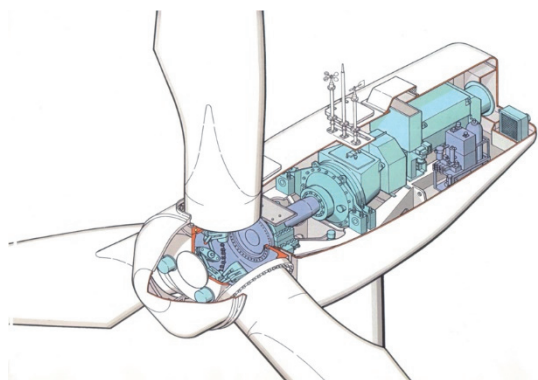


風車実測データに基づく主要構造部材の期待寿命の推定

Lifetime Estimation of Wind Turbine Machinery Components Based on Measurement Data



林 義之^{*1}
Yoshiyuki Hayashi

三宅 寿生^{*2}
Hisao Miyake

岡野 靖^{*3}
Yasushi Okano

風車は自然環境の中で運転されるため、その疲労寿命は風車に流入する風の特性に左右される。風の特性の中でも乱流強度は風車の立地点によって異なることがあり、その結果として同じ風力発電所に立地する風車であっても疲労寿命に差を生じる場合がある。一方で、風車ごとの疲労寿命をきめ細かく把握し、対策を行うことは、安全・安心かつ効率的な風車の運用において重要である。この課題に対し、風車に蓄積されたデータの分析と荷重解析手法を組み合わせることで、風力発電所内の風車ごとの期待寿命を精度良く評価する技術を実現したので、その概要を紹介する。

1. はじめに

一般的な風車は規格(IEC など)に定められた風条件を想定し、疲労荷重解析を行った上で、所定の設計寿命を有するように設計される。風車では有限寿命設計(繰返し荷重が有限回数を超えて作用すると破壊に至る可能性があることを考慮した設計)を行うため、繰返し荷重の大きさと繰返し数の見積が重要となる。繰返し荷重の見積では、風車に流入する風の特性即ち風況の把握が重要である。

一方で、風車立地点の実風況は、規格に定められた想定風況とは大きく異なることがある。実風況が想定風況よりも緩やかな(風の乱れが小さい)場合には、期待寿命の伸長に伴って運用期間を延長できた場合、当初の事業計画時よりも多くの生涯発電量が得られる。逆に実風況が想定風況よりも厳しい(風の乱れが大きい)場合には、安全に配慮するために、運用中止や運転制限といった処置が必要になる。いずれの場合もLCOE(Levelized Cost of Electricity, 均等化発電原価)に直結することから、期待寿命の定量的な把握は風車を運用する発電事業者にとって重大な関心事である。

そこで三菱重工業株式会社(以下、当社)では、お客様より長期間の風車運転データの提供を受け、実風況下における風車ごとの期待寿命の推定を行った。

本報では約13年間の実運転データに基づく主要構造部材の期待寿命を算出し、長期運用における風車の健全性確認を行った事例について紹介する。

2. 風況・運転状況の分析、疲労荷重解析

2.1 風況及び運転状況の分析

図1に本報で紹介する風力発電所の外観と風車配置を示す。本発電所には当社製1MW機

*1 エナジードメイン 風力エネルギー部 グループ長

*2 エナジードメイン 風力エネルギー部 部長

*3 エナジードメイン 風力エネルギー部 主席技師

(MWT-1000A⁽¹⁾)が20機、尾根上に配置されている。風車によって、標高や風車周辺の地形が異なることから、風車に流入する風にも差を生じることが予想される。

風車の疲労荷重解析では、風況を表す諸量のうち風速の時間的な変動の大きさである乱流強度(平均風速に対する風速の標準偏差の比)が特に重要となる。

そこでSCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)システムに蓄積された全風車の運転データを用いて乱流強度(図2)を算出した。ばらつきの影響を排除するために、約13年間の長期データを用いて各風車の乱流強度の特性値を同定した(図3(a))。その結果、最も乱れが大きい16号機の乱流強度は最も小さい1号機の1.4倍であることが判明した。また過出力警報(出力が規定値を超過し運転停止した際に出る警報)の発報回数を調べたところ(図3(b)), 16号機が最多であり、1号機は比較的少ないことが分かる。これは風速の変動が大きいために風車のピッチ制御が十分追従できず、出力が規定値を超過したためであり、警報の発報回数は乱流強度の大小と相関があると考えられる。

以上のことから、疲労荷重解析の対象風車として、1号機と16号機を選定した。また中程度の乱流強度の風車として10号機も選定した。

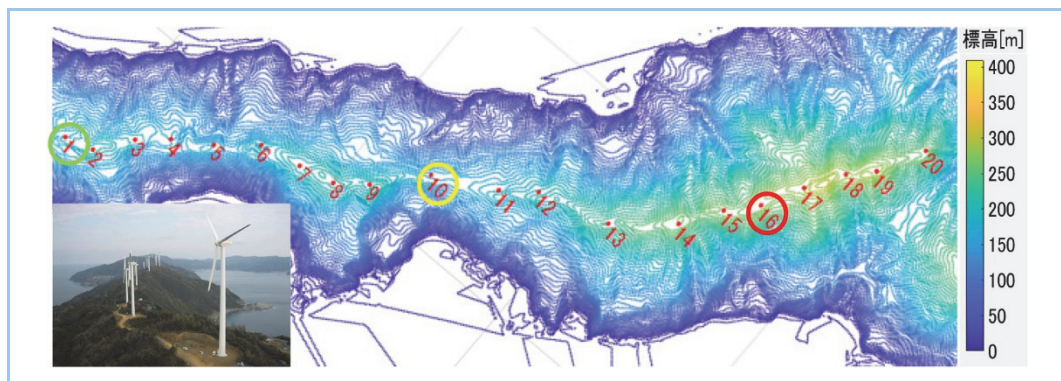


図1 風力発電所の外観と風車配置

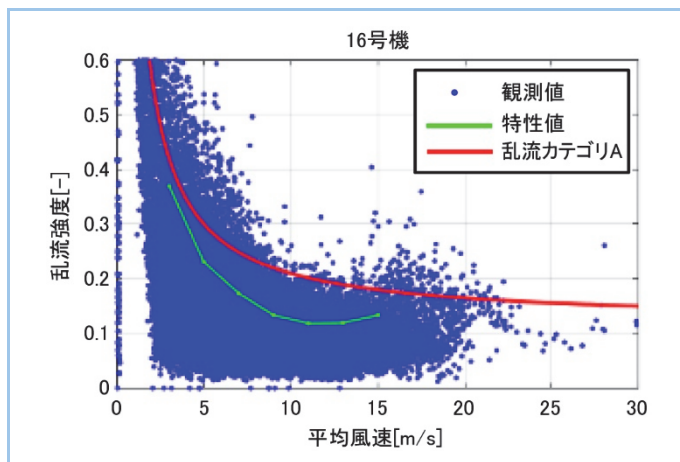


図2 乱流強度(16号機の例)

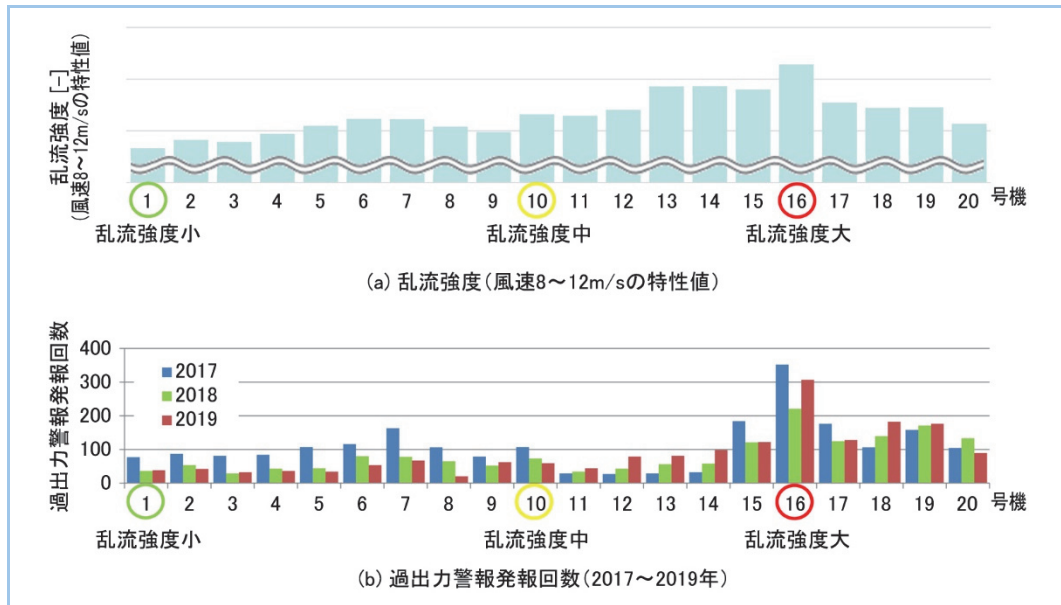


図3 各風車の乱流強度と過出力警報発報回数

2.2 疲労荷重解析

風車における疲労荷重解析の流れについて概説する。

風車の疲労荷重は、ブレード・ナセル・タワーからなる風車全体の動的応答モデルを用いた時刻歴応答シミュレーションによって求められる(図4)。解析に先立ち、風車全体を覆う格子面に対して所定の統計量を有する3成分速度場を作成しておき、これを風車に作用させながら逐次数値積分を行うことで、風速の時間変化と空間分布を考慮したシミュレーションを行うことができる。なお風条件としては、2.1節で述べた乱流強度に加えて、鉛直方向の風速分布(ウィンドシェア)、水平面に対する気流の傾斜(吹上角)、空気密度を加味する。

次に運転風速範囲(発電を開始するカットイン風速から発電を停止するカットアウト風速まで)を2m/s刻みでシミュレーションを行う。また前述の過出力警報による停止動作もシミュレーションする。シミュレーションで得られた風車各部の荷重時系列波形に対してレインフロー法を適用し、繰返し荷重振幅ごとの繰返し数として整理する(レインフロー行列)。繰返し数に運転データから求めた各風速の発生頻度と警報回数を乗じることで評価期間中の繰返し数を得る。最後にレインフロー行列に評価対象部位の材料特性(m :Wöhler 係数)を考慮することで疲労等価荷重を求める。

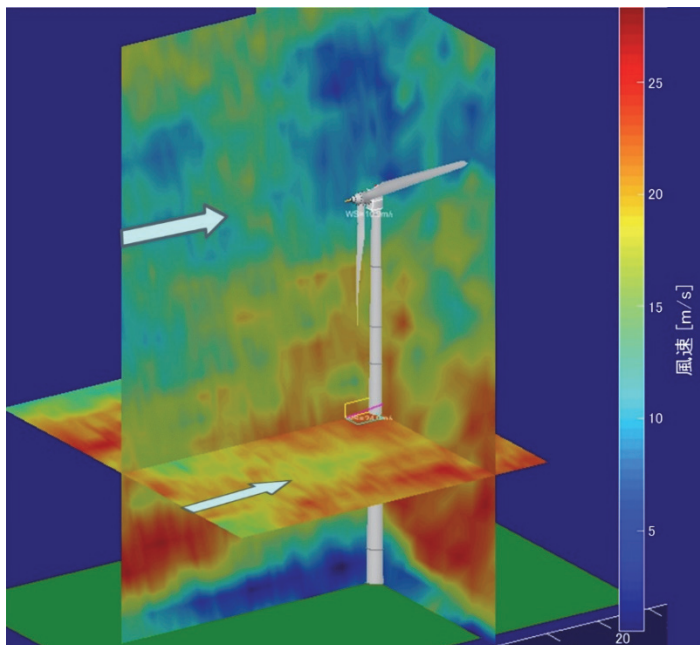


図4 時刻歴応答シミュレーション

なお当社では、隣接する類似した地形に立地する風車において荷重計測を実施し、風速の空間分布の乱れによる疲労荷重の増加を割増係数として定量化している。本発電所においてもナセル風速計では観測できない風速の空間分布の乱れによる疲労荷重の増加が予想されたため、割増係数を加味することで疲労荷重の推定精度を向上させた。

図5に各風車の $m=10$ に対するハブモーメント(回転座標・固定座標)の疲労等価荷重(設計時の疲労等価荷重に対する比)を示す。これより乱流強度が最大である16号機の疲労等価荷重は他風車と比べて8~27%大きく、設計想定を上回る可能性があると推定された。

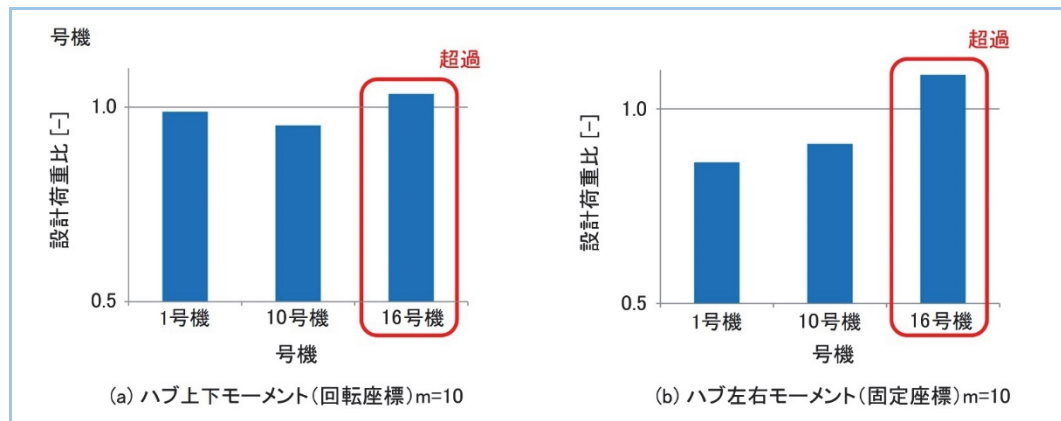


図5 ハブモーメントの疲労等価荷重(設計時荷重に対する比)

3. 疲労強度評価と対策立案

風車部品に生じる応力は、荷重入力点における複数の荷重成分に対する発生応力の線形和として表現できるが、多くの場合は1つないし2つの荷重成分が支配的である。いずれの荷重成分が支配的であるかは、有限要素法を用いて機械部品ごとに作成された影響係数(作用荷重成分と発生応力の関係を定める行列)を調べることで特定できる。したがって、支配荷重成分の増減から応力の増減を把握でき、これを疲労限度線図に当てはめることで期待寿命(ここでは所定の生存確率及び信頼レベルを維持できる運用期間を指す)が推定できる。

前章で得られた疲労等価荷重をもとに、荷重伝達経路上の主要構造部材(ブレード、ハブ、主軸、主軸受台、ナセル台板)について期待寿命の推定を行った。図6に本報における評価対象部品を図示する。

有限要素法によって得られる応力コンター図から応力評価点(総数177点)を選定する。さらに最弱部(11点)を抽出し、前章に示した疲労等価荷重を用いて期待寿命を推定した結果を図7に示す。乱流強度が最大である16号機では、疲労寿命が計画運用期間である20年に満たない部位(主軸受台 R部)が存在する。

設計上の裕度を勘案すれば実際に損傷を生じることはなく、運用上の問題はないと考えられたものの、より安定運転を期待した対策として、カットアウト風速を25m/sから16m/sに低減することにした(図8)。これにより20年を超える期待寿命を確保できる見通しを得た。

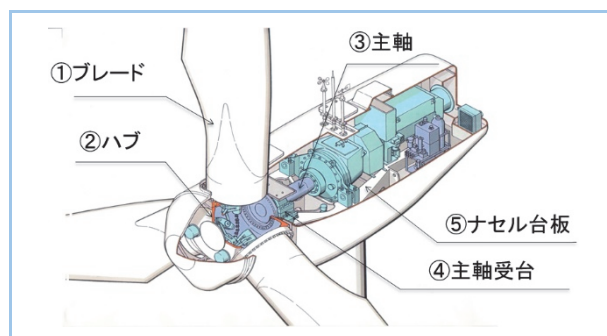


図6 評価対象部品

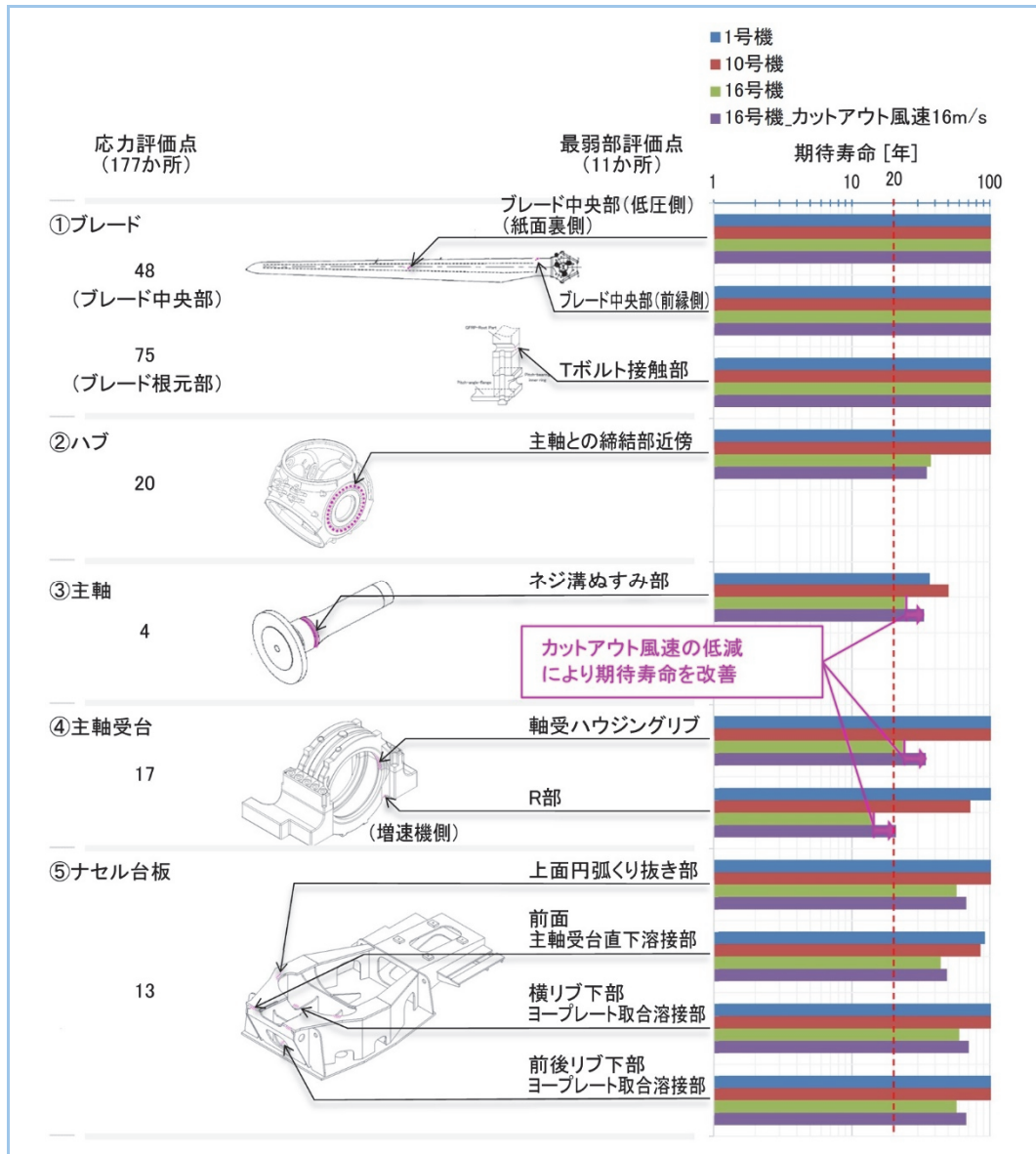


図7 期待寿命評価結果

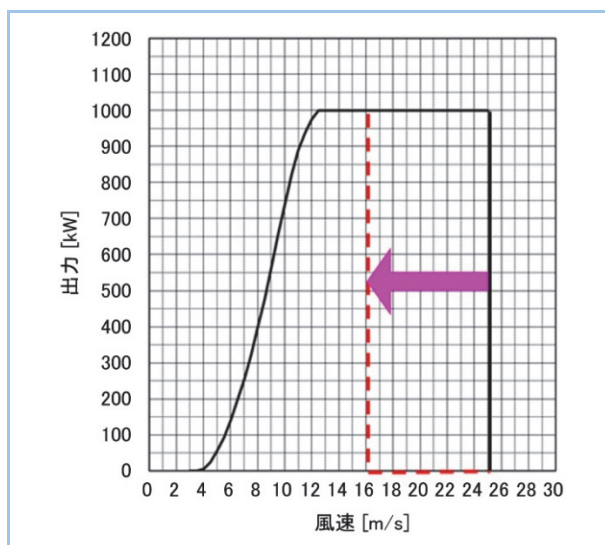


図8 対策の例:カットアウト(発電停止)風速の低減(赤点線)

4. まとめ

本報では、長期にわたる風車運転データの分析と疲労荷重解析及び疲労寿命評価の一例を紹介した。本例では同一発電所であっても風車によって風況が異なり、期待寿命にも差があることを示した。また期待寿命が計画運用期間に満たない場合の対策とその効果を例示した。

本報で示した評価は風車運転データを活用するため、一定期間の実運用を経たプロジェクトの安全性評価や運転延長可否の判断に適用できる。一方、まだ運転データがない新規プロジェクトの場合には、風車ごとに異なる風況を本報とは異なる方法で評価する必要がある。

具体的には複雑地形を対象とした非定常流動解析(図9)と時刻歴応答シミュレーション(図4)を組み合わせることで、風車周辺地形の差による風速の空間分布を再現した評価が可能になると考えられ、今後の検討課題である。

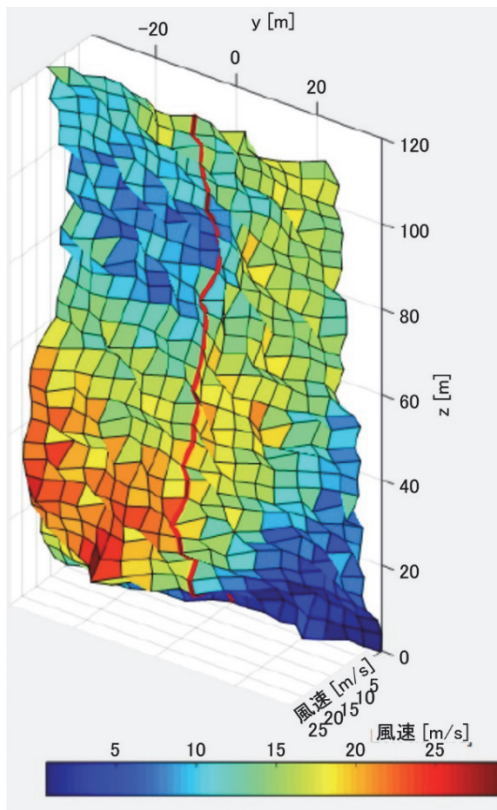


図9 非定常流動解析の結果の一例

なお本報で使用した風車データは、三崎ウィンド・パワー株式会社、丸紅株式会社にご提供を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 上田ほか, 三菱重工の新 1000kW 風車, MWT-1000A, 三菱重工技報 Vol.41 No.1 (2004) p.28~29