

京都府太鼓山風力発電所3号機ナセル落下事故に関する報告書(概要版)

2013年12月26日

1. 太鼓山風力発電所とナセル落下事故の概要

(1) サイト概要

- 所在地：京都府与謝郡伊根町字野村小字太鼓山(図1-1)
- 定格出力：450kW(750kW/基×6基)
- 運転開始：平成13年11月15日

(2) 風力発電設備の概要

- 風車：オランダ ラガウェイ社(以下LW社)製(図1-2、3)
- タワー：日本 日本鋼管(株)(現JFEエンジニアリング(株))製
- 定格出力：750kW
- 回転数：13~33rpm
- ロータ：直径 50.5m、取付位置 地上 50m

(3) 事故の概要

- 日時：3月12日19:32に運転停止(推定)
3月13日9:42 現地に於て3号機ナセル落下を確認
- 状況：タワーの風車接続フランジ下でタワーが破断し、ナセル/ブレードが地上へ落下(写真1-1)

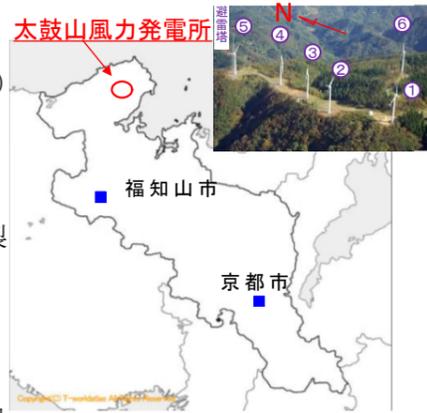


図1-1 位置図

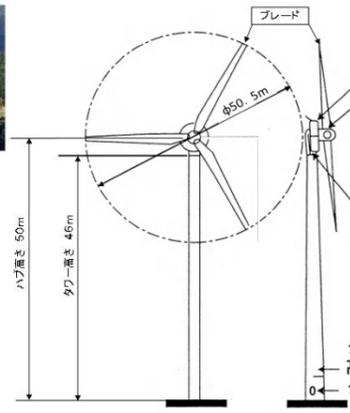


図1-2 風車外形図

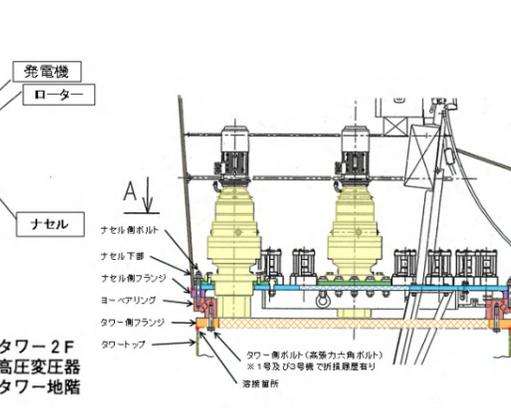


図1-3 タワートップ及びナセルの断面図



写真1-1 ナセル落下とタワーの破断状況

2. 事故状況

(1) 事故発生時の気象状況・風況

- 事故が発生した3月12日の3号機の風況観測データから、事故発生前は概ね南西の風、最大風速15~20m/s、1分間平均風速約11~15m/sで推移していた。3号機の風況データ及び運転状況を図2-1、図2-2に示す。
- 事故発生前(3月12日19:32)の3号風車での風速観測データ
 - 【風向】 SW(南西) (1分間データ)
 - 【最大瞬間風速】 14.5m/s (1分間データ)
 - 【10分平均風速】 10.9m/s

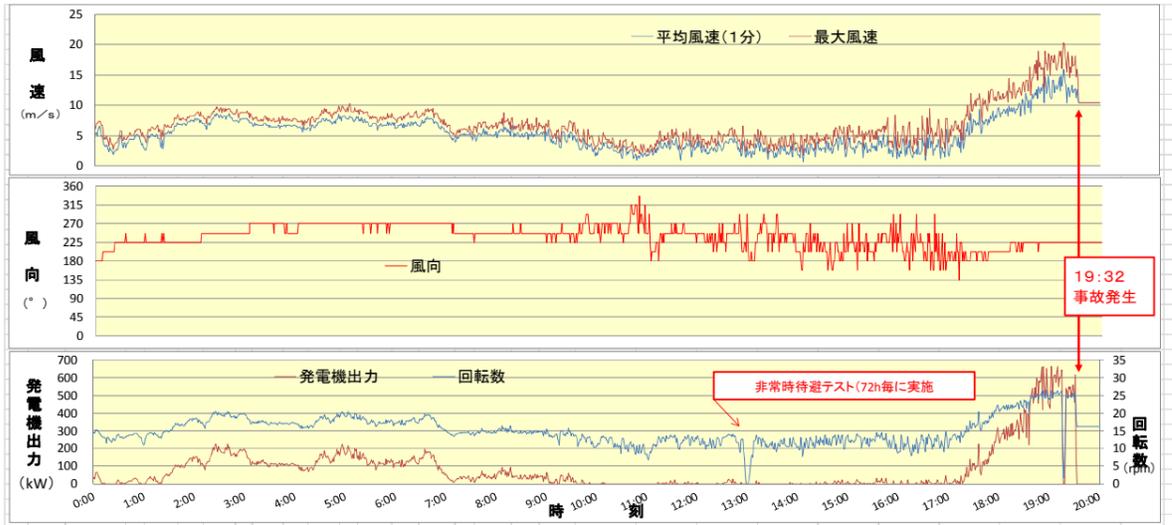


図2-1 3号機の風況データ及び運転状況

(2) 事故発生時の風車の運転状況

- 事故発生前の運転状態は、19時頃から概ね回転数25rpmで推移し、発電機出力は430kW~660kWの出力が得られていた。
- 事故発生直前の状況：
 - 【回転数】 25.7rpm (1分間データ)
 - 【発電出力】 614kW (1分間データ)



図2-2 3号機の運転状況(詳細)

(3) ナセルとタワーの損傷状況

- タワーの損傷状態は、タワートップとフランジ溶接部付近で破断しており、特に主風向の反対に位置する北から東の位置でタワートップの風車接続フランジとシェル(タワー母材)の間の溶接止端部付近で破断している。
- タワーの破断位置を図2-3に示す。また、タワー破断状況を写真2-1~3に示す。

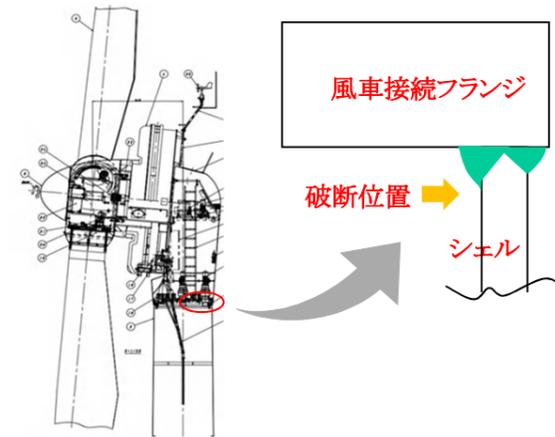


図2-3 タワー破断位置

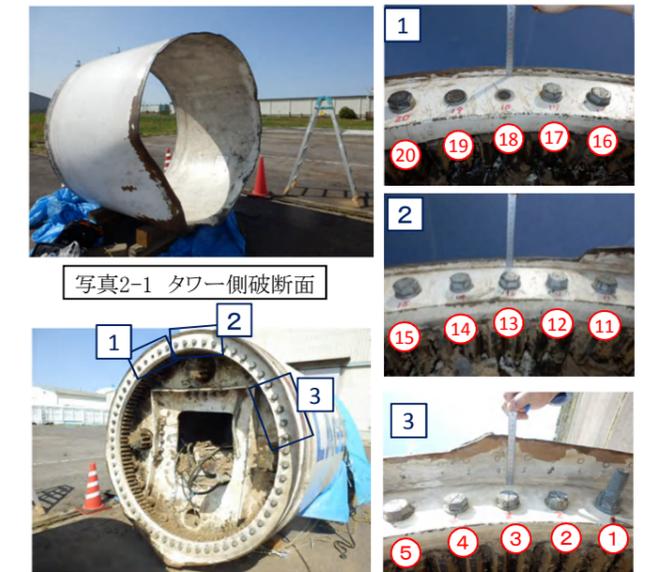


写真2-1 タワー側破断面

写真2-2 ナセル側破断面

写真2-3 ナセル側破断面

(4) タワーの破断部の状況

- 破断面の円周方向の状況を確認した結果、図2-4に示すとおり、ボルトNo13~23の範囲で、き裂はフランジ下端が最も近く、溶接止端部と一致したところで発生したことが確認されている。また、ほぼ同じ範囲において、ボルトの緩みや折損が確認されている。
- このことから、ボルトNo13~23の範囲でまず疲労き裂が進み、その後、疲労破断から延性破断に変化して円周方向に進展し、最終にナセル/ブレードが落下したと推定される。

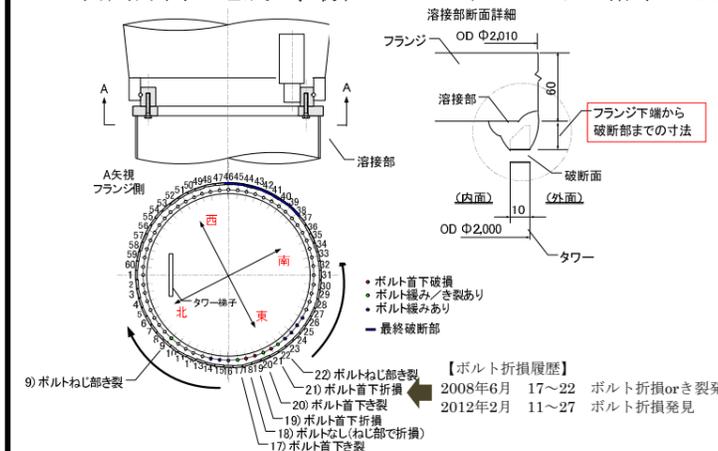


図2-4 円周方向のき裂の状況

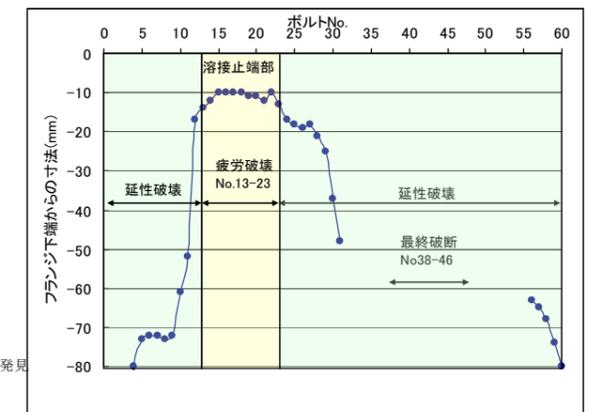


図2-5 フランジ下端から破断部までの寸法

3. 事故原因の究明

(1) タワートップ破断部の調査

< 疲労破断状況 >

・タワートップボルトNo.13~23の範囲内の破断面組織観察及びSEM観察の結果、次のことが確認され、タワートップ溶接部の疲労破断であることが確認された。

- ① 応力集中部である内面側の溶接止端部からき裂が発生し破断面組織に変形が無く、破断している。(写真3-1参照)。また、き裂発生後、応力の変動により破断面が繰り返し開閉して押し潰された痕がある。(写真3-3参照)
- ② SEM観察により、疲労破面に特徴的なストライエーションが観察される。(写真3-4参照)

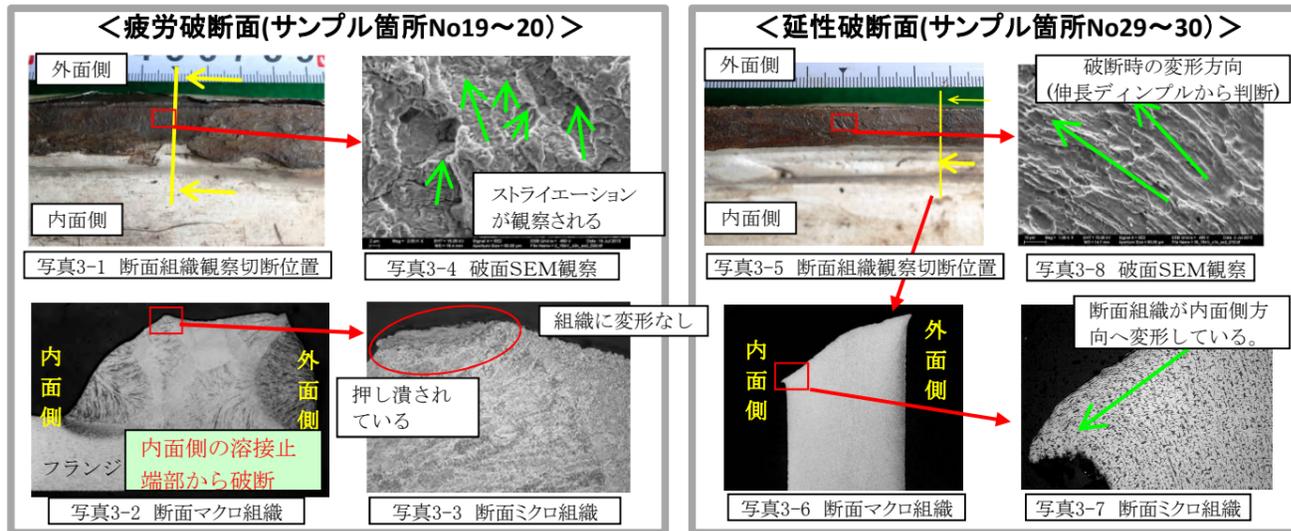
< 延性破断状況 >

・タワートップボルトNo.13~23以外の範囲の断面組織観察及びSEM観察の結果、次のことが確認され、タワーの延性破断と考えられる状況が確認された。

- ① 断面組織の変形が見られる。(写真3-7参照)
- ② 破断時の変形方向が、伸長ディンプルにて確認できる。(写真3-8参照)

【調査結果】

・破面のSEM観察等から、タワートップの溶接止端部内面側にき裂が発生し、その後、疲労破断から延性破断に変化して円周方向に進展した後に、最終的に全周破断に至ったものと考えられる。



(2) 風力発電サイトにおける風況の解析

< 各号機における平均風速と乱流強度の分布 >

・風車設置地点と避雷鉄塔における平均風速と乱流強度をLESモデルを用い、3次元非定常解析により求めた。
 ・ハブ高さにおける無次元風速のベクトルと風速比(実地形風速と平坦地形上の風速との比)について、モデル図を図3-1、コンター図を図3-2に示す。西側崖地形の影響により、風車設置地点では増速していることがわかった。

【調査結果】

・太鼓山風力発電所の風車全6機の平均風速と乱流強度を調べた結果、各号機の年平均風速は6.52~7.26m/sであり、風車の国際基準(IECクラスII、8.5m/s)の値よりやや低くなっている。ハブ高さ(約50m)における吹上げ角はほぼIECの規定の範囲内に収まっているが、西方向を中心に各々高い値となっている。風速別の風方向乱流強度は各号機による違いも殆ど見られず、ほぼIECの値以下に収まっているのに対して、風直角方向の乱流強度比(Iv/Iu)と鉛直方向の乱流強度比(Iw/Iu)は共にIECの値を上回っており、特に西方向付近の風で大きな乱れとなっていることが確認された。その内容を図3-3~7に示す。

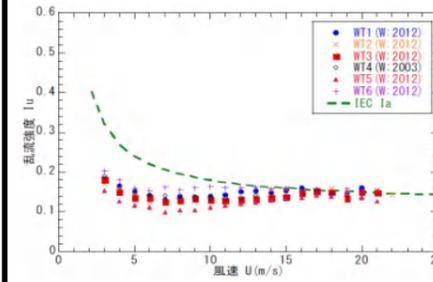
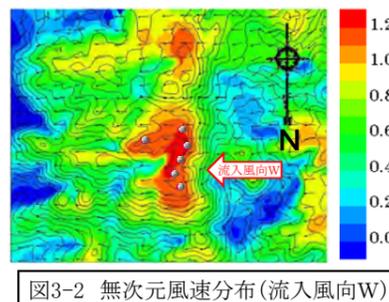
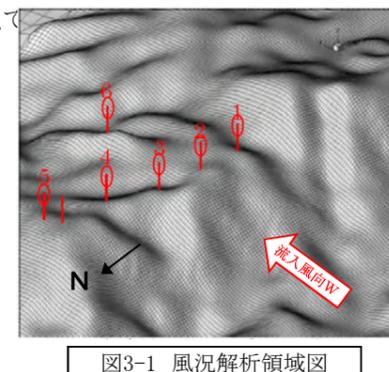
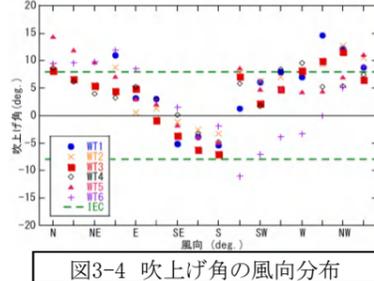
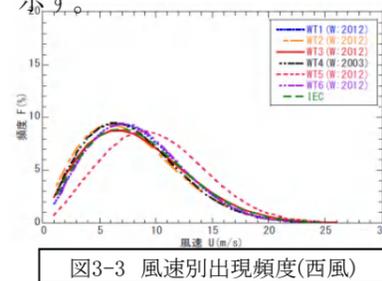


図3-5 風速別乱流強度(西風)

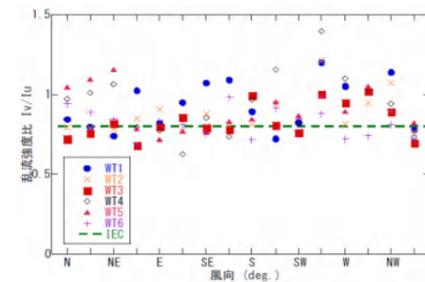


図3-6 Iv/Iuの風向分布

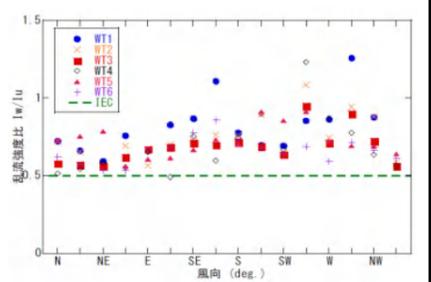


図3-7 Iw/Iuの風向分布

(3) 3号機タワートップ部ボルトに関する調査

< タワートップボルトの折損と点検の履歴等 >

・太鼓山風力発電所においては、表3-1に示すとおり、3号機で事故時を含め3度のタワートップボルト折損が確認されている。最初にタワートップボルトの折損が確認された平成20年6月以降の定期点検からは、表3-2に示すとおり合いマークによる目視確認に加え、年2回全タワートップボルト数の10%(6本)のトルク確認(680Nm)を実施してきたが、平成24年2月には定期点検後約2か月、平成25年3月には定期点検後約3か月の間にタワートップボルトの折損が確認されている。なお、タワートップボルトの維持管理及び交換はメーカーのサービスマニュアルに従い実施している。

表3-1 3号機タワートップボルトにおける点検と折損等の履歴

ボルトNo	H20 5/13	H20.6.9	H20 11/22 ~ H23 12/14	H24.2.4	H24 8/9	H24 12/22	H25.3.12 (事故後)
9		取替					き裂(ねじ部)
10		取替					
11		取替					
12		取替					
13		取替					
14		取替					
15		取替					
16		取替					
17		取替					
18		取替					
19		取替					
20		取替					
21		取替					
22		取替					
23		取替					
24		取替					
25		取替					
26		取替					
27		取替					
28		取替					
29		取替					
ボルト不良	6本 (他に16本強み)		17本				14本
備考			点検後 約2か月				点検後 約3か月

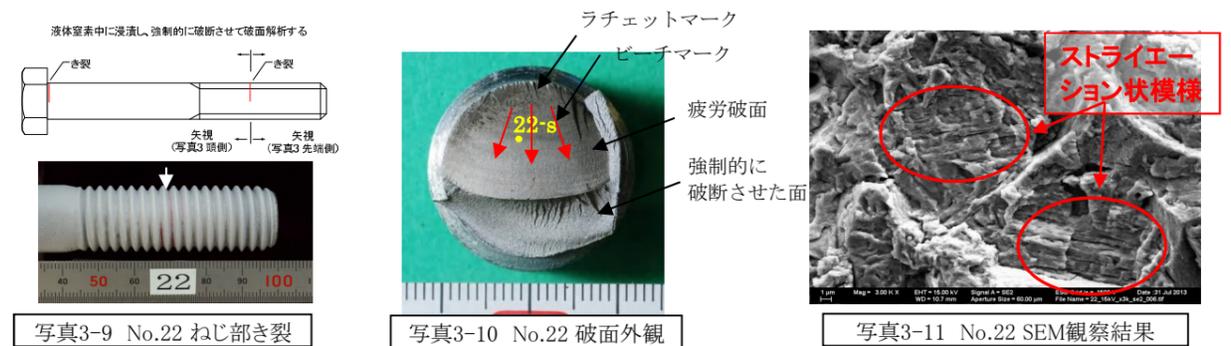
表3-2 タワートップボルトの定期点検の内容

項目	サービスマニュアル	実施内容
○ 締め付けトルク	850Nm 前回の結果と比較し、増し締めが不要だった場合、チェック間隔を短く目視チェックに切り替える可能性がある。	> H14~16年度 680Nmでトルク確認 > H17~20年度上期 合いマーク確認 > H20年度下期以降 680Nmでトルク確認 合いマークによりボルト全数を目視確認 ※トルクレンチは3か年毎に更新
○ 点検間隔	1年毎に5%(3本)をチェック 運転開始後、500時間で全てのボルトのチェックを行う。	> H14年度 年1回実施(3本) > H15年度以降 年2回実施(2本×2回) (H17~20年度は、合いマーク確認のみ) > H20年度下期以降は10%(6本)をチェック
○ ボルト交換	新しいボルトには、二硫化モリブデングラファイトグリースを塗ること。(オイル使用不可)	> H24.2月の交換時にマニュアルどおり塗布 (ボルト購入時に同時に購入)
○ ボルト交換時の手順	記載無し ※締付要領(配付なし) 原則対角送り2段階締め	> 任意の順番で2段階締め (1段階:500Nm、2段階:850Nm)
○ 溶接部	年1回フランジ周辺の溶接部を丁寧に検査	> 年2回 タワー溶接部を目視点検

< タワートップボルトき裂部のSEM観察及び破面マクロ観察 >

・3号機のタワートップボルトNo.19(首下折損)、No.9(ねじ)、No.20(首下)およびNo.22(ねじ)の4本について破面観察を実施した結果、次のことにより、いずれも疲労破断であることが確認された。

- ① 疲労破面に特徴的なラチェットマーク状の段差及びビーチマークが確認された。
- ② SEMによる破面観察で、疲労破面に特徴的なストライエーションが確認された。
- ③ ねじの谷部や首下の応力集中部を起点とし、疲労き裂が段階的に進展したと推定される。



【調査結果】

・今回の結果から、トルクチェック及び合いマークによる目視点検は、緩みは確認できるが、ボルトにき裂が発生していても、現行のマニュアルによる定期点検では異常が発見できない場合があることがわかった。

(4) タワートップ部の構造解析の結果

・ボルト折損時のタワートップ溶接部への影響を明らかにするため、FEM解析を実施した。その結果、ローター側に重心位置があり、その対面のタワートップボルトには引張応力が作用しており、そのボルトの折損によりタワートップ溶接部内側の引張応力は、著しく増大することを確認した。この応力集中により疲労が蓄積しタワーの破断に至ったものと推測される。

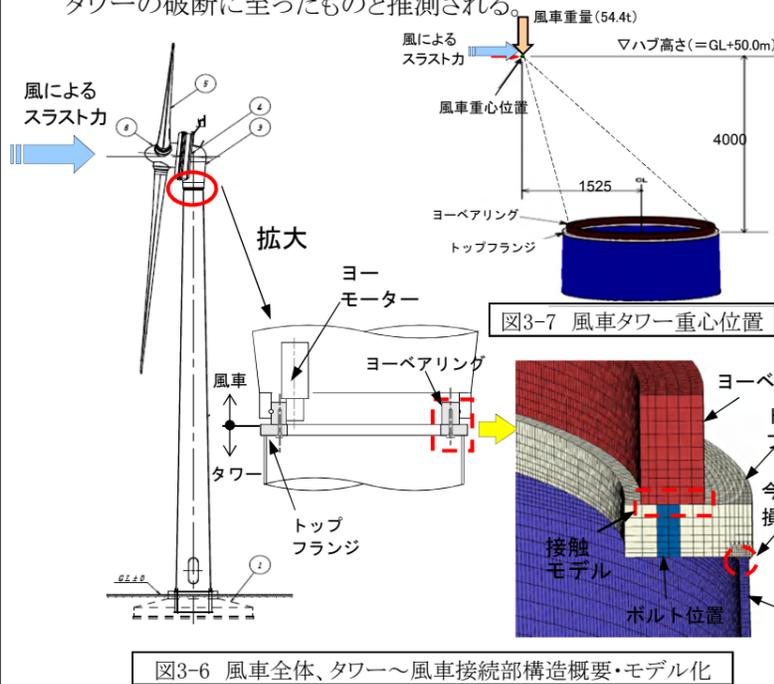


図3-6 風車全体、タワー～風車接続部構造概要・モデル化

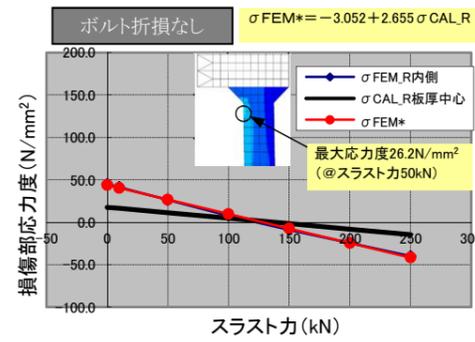


図3-7 風車タワー重心位置

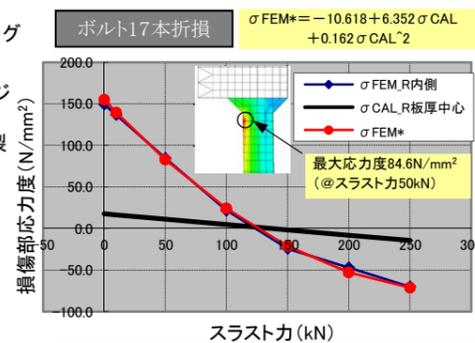


図3-8 スラスト力と損傷部応力度の関係

(5) タワー損傷部の疲労寿命評価

・当該事故風車(3号機)は平成23年12月14日の定期点検の後、平成24年2月4日に計17本のタワートップボルト折損が発見され、また平成24年12月22日の定期点検の後、ナセル落下事故が発生した平成25年3月12日にボルト14本の折損と緩み(事故後調査により)が発見された。ボルト折損の期間はそれぞれ約1.7ヶ月(50日)と約2.7ヶ月(80日)である。これらのボルト折損を考慮したタワーの疲労寿命を評価し、タワーに疲労き裂が短期間に発生する可能性を調べた。ボルト折損は冬季に発生していることや、風況調査結果から冬季は風がほぼ西から吹いていることから、西風時のタワーの疲労寿命を評価した。

なお、疲労寿命評価の際には、風観測と風況予測から得られた現地の風の乱れを考慮した。タワー損傷部の疲労寿命の評価結果を表3-3及び図3-9に示す。

表3-3 疲労寿命の予測結果

解析ケース	条件	20年間累積疲労損傷度	疲労寿命
ケース1	ボルト正常 + IEC標準乱流	0.742	27年
ケース2	ボルト正常 + 現地の風の乱れ	0.940	21年
ケース3	ボルト17本折損 + 現地の風の乱れ	79.3	0.25年 (約3.0ヶ月)

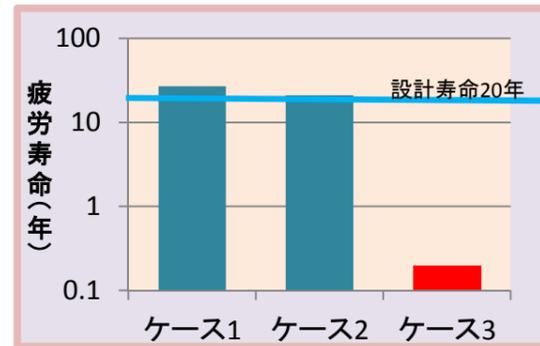


図3-9 疲労寿命の比較

【調査結果】

- ・IECの標準乱流モデルにより評価された風車タワー溶接部の疲労寿命は設計疲労寿命の20年より長く、現地の風の乱れを考慮しても、設計寿命内に風車タワー溶接部が疲労損傷に至らなかった。
- ・一方、ボルトが折損した場合には、応力集中によりタワー損傷部に過大な応力が発生し、その結果、タワー損傷部の疲労寿命はボルト正常時の100分の1程度に短くなった。
- ・ボルト折損時におけるタワー損傷部の疲労寿命は、ボルト折損の期間とほぼ一致したことから、当該事故風車のタワーの損傷はボルトの折損により引き起こされたことと推定された。

4. 事故原因のまとめ

タワートップ破断部の調査、タワートップボルトに関する調査、風力発電サイトにおける風況の解析、タワートップ部の構造解析、タワートップ破断部の疲労寿命評価から、事故原因は以下のとおり。

- ① タワートップフランジの溶接止端部近傍の内側で疲労き裂が発生し、疲労破断から延性破断に変化して円周方向に進展し、最終的に全周破断に至り、ナセルが落下した。
また、タワートップボルトの調査により、多数のボルトの折損状態であったことから、現在の定期点検の内容では、ボルトのき裂を発見できない場合があることが確認された。
- ② 風の評価、風応答解析及び構造解析を実施し、当サイトでの風の乱れを考慮した疲労寿命評価を行った結果、ボルト17本折損時に、タワートップ溶接部にボルト折損がない場合の約3.2倍(スラスト力50kNの場合)の引張応力が作用し、約3.0か月で疲労損傷に至る結果を得た。

上記、①②の結果から、タワートップボルトの折損により、タワートップフランジ溶接部内側の引張応力が著しく増大し、短期間に疲労寿命に達したことにより、タワートップ溶接部の破断が引き起こされたと推定された。なお、他号機タワートップ溶接部の調査結果から、き裂がないことが確認された。

5. 再発防止策

タワートップボルトの折損等を事故前の定期点検において未然に発見することができなかったことが、今回の事故原因であることから、タワートップボルトのき裂を早期に発見するための定期的な超音波探傷試験及びタワートップボルトの健全性を担保するためのボルト交換とした再発防止対策を策定した。この再発防止対策は、保安規程に定める電気工作物の巡視・点検及び測定に関する実施要項に組み入れて実施することとする。今後引き続き、タワートップボルト折損防止対策の検証を行うとともに、風力発電所の安全運転に努める。

表5-1 再発防止対策

項目	問題点	対策	整備するマニュアル	備考
超音波探傷試験によるき裂の早期発見	目視確認及びトルクチェックだけでは、ボルトの緩みを検知することはできても、早期のき裂を検知することができない場合がある。	定期的にタワートップボルト全数の超音波探傷試験を実施し、タワートップボルトのき裂を早期に発見する。また、試験に当たっては、確実に適切に実施するためのマニュアルを整備する。	超音波探傷試験マニュアル	対応済
タワートップボルトの定期点検と交換	ボルトの取替が想定されていなかったため、取替時の施工要領等がない。	タワートップボルトのき裂又は緩みを発見した場合は、早期に取替を実施する。タワートップボルト定期点検とボルト交換に当たっては適切に実施するためのマニュアルを整備する。	タワートップボルト定期点検要領	対応済
タワートップボルト折損対策	タワートップボルト折損防止対策の検証が必要	各種ボルトについての軸力調査、FEM解析、寿命予測を実施するとともに、ボルト折損対策の検証を行う。	-	今後検証

6. まとめ

今回のナセル落下事故に関する原因究明では、タワートップ溶接部及びタワートップボルトの破面調査、破面SEM観察、FEM解析、風応答解析を実施した結果、ボルト折損によりタワー溶接部の応力が著しく増大し、溶接止端部近傍の内面で疲労き裂が発生し、ナセルが落下したことが明らかとなった。

また、実施していた定期点検では、タワートップボルトのき裂を発見することができなかったため、ボルトの折損から最終的にタワーが破断することとなった。

今回の事故原因を鑑み、タワートップボルトのき裂を早期に発見するための定期的な超音波探傷試験及びタワートップボルトの健全性を担保するためのボルト交換とした再発防止策を確実に実施するとともに、タワートップボルト折損対策の検証を行う。

今後、事故機以外の風車の運転再開にあたっては、再発防止策を確実に実行するとともに、風力発電所の長期に亘る安全運転に努めていく。