

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(案)

2013年11月17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：4500kW(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

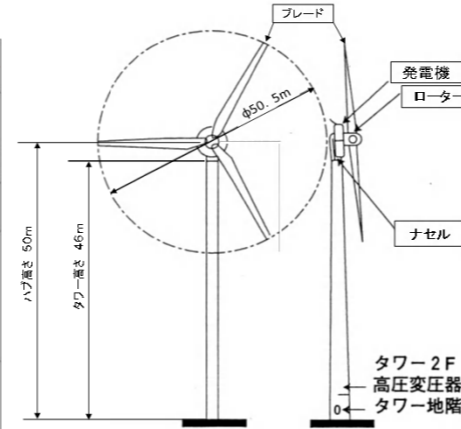


図1-2 風車外形図

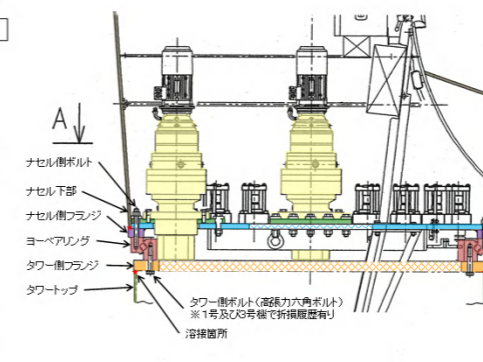


図1-3 タワートップ及びナセルの断面図



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

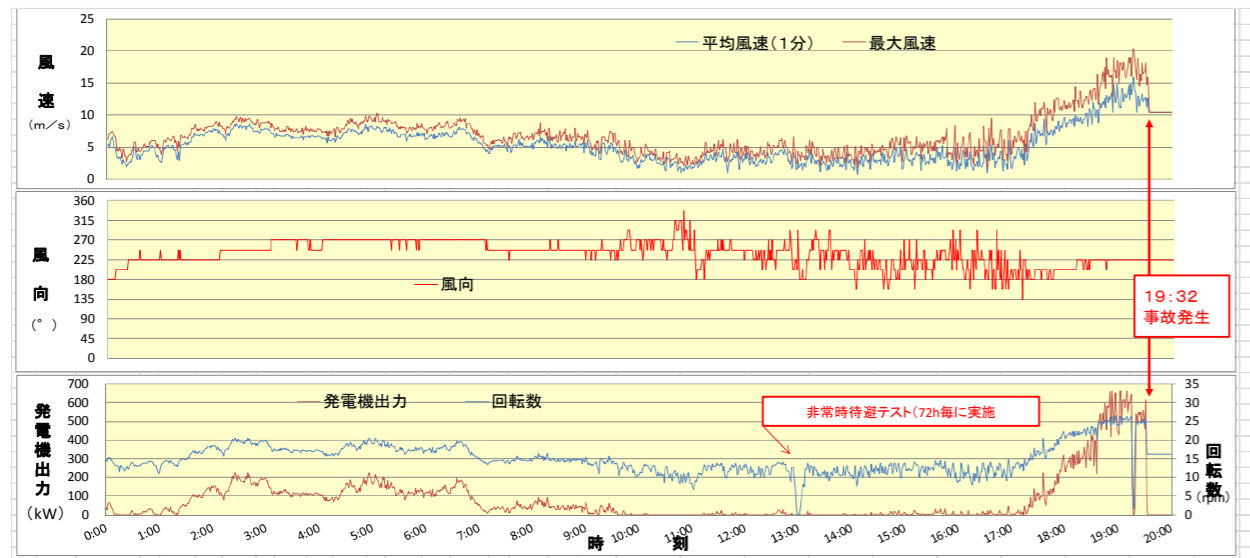


図2-1 3号機の風況データ及び運転状況

(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。

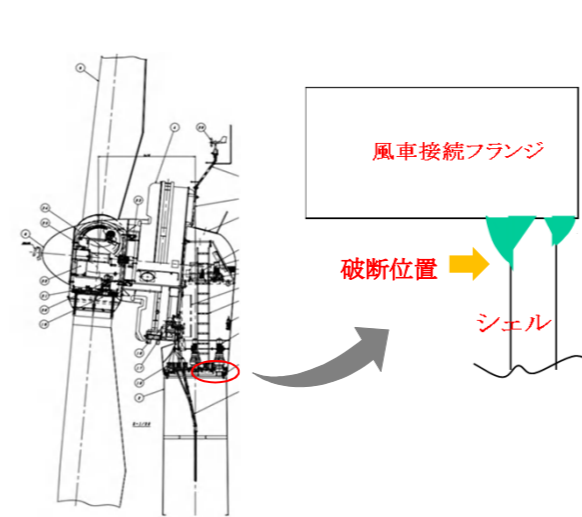


図2-3 タワー破断位置

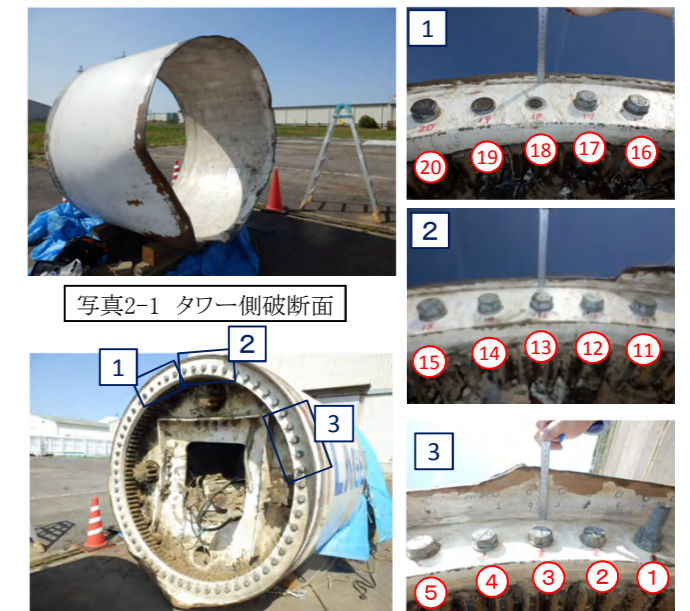


写真2-1 タワー側破断面

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、亀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、ボルトの弛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壊に変化して円周方向に進展し、最終にローター・ナセルが落下したと推定される。

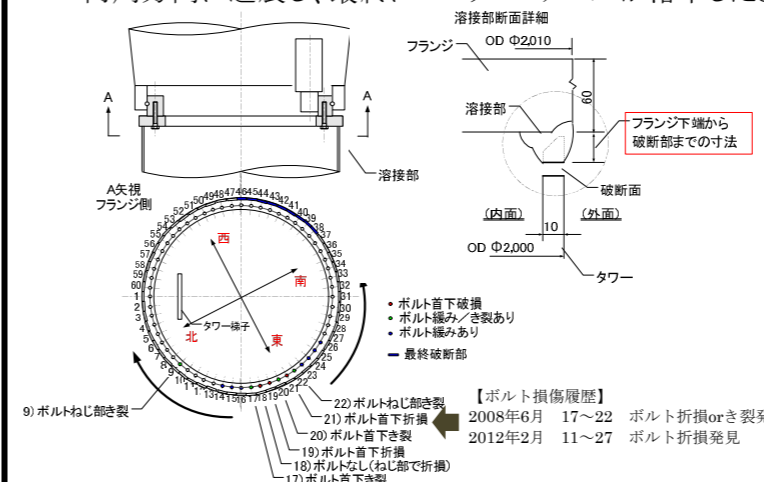


図2-4 円周方向の亀裂の状況

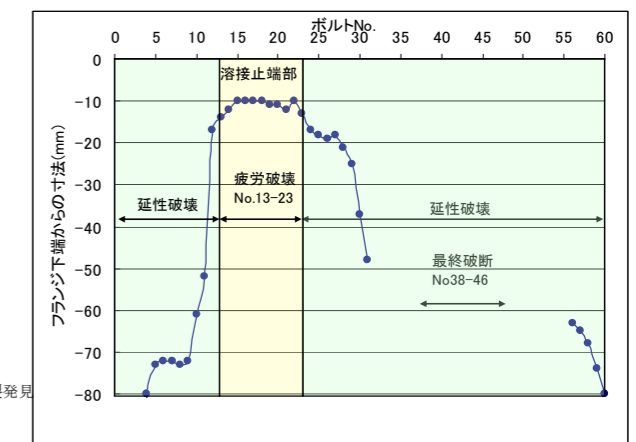


図2-5 フランジ下端から破断部までの寸法

3. 事故原因の究明

(1) タワー破断面の調査

< 疲労破断状況 >

・ボルトNo.13～23の範囲内の断面組織観察及びSEM観察の結果、次のことが確認され、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つぶされた痕がある。

(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 >

・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、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】

・破断面のSEM観察等から、タワートップ部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。

< 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(頭なし折損), 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 疲労破面として特徴的なラチェットマーク状の段差およびビーチマークが認められる。

② SEMによる疲労破面観察では、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 ねじの谷部か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。

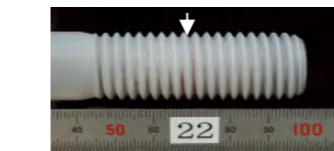
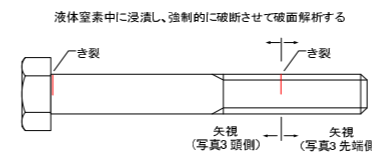


写真3-9 No.22 ねじ部き裂

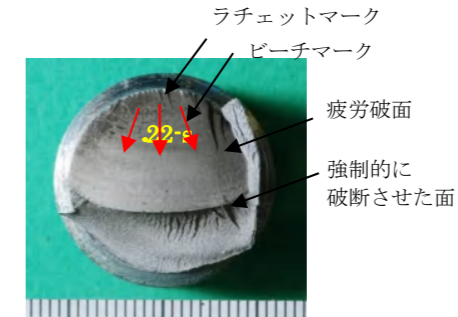


写真3-10 No.22 破面外観

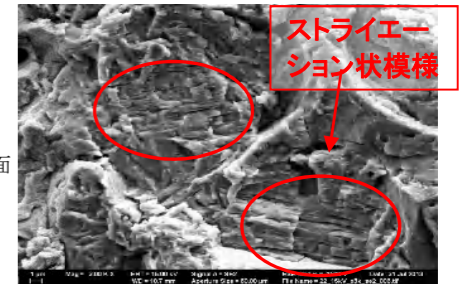
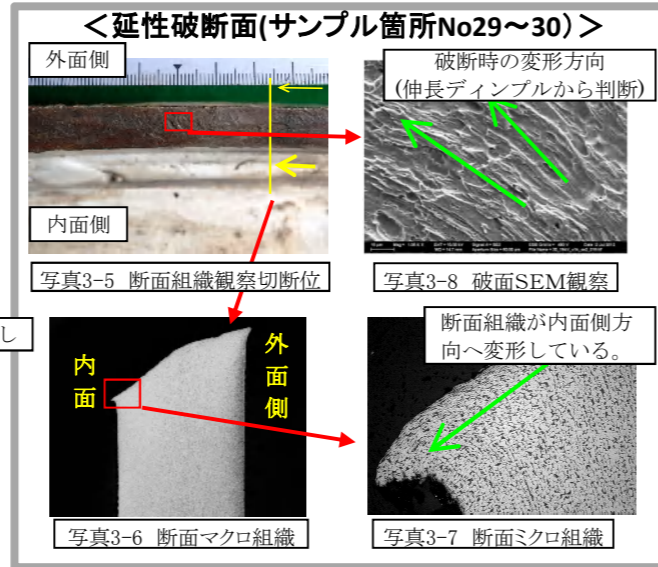
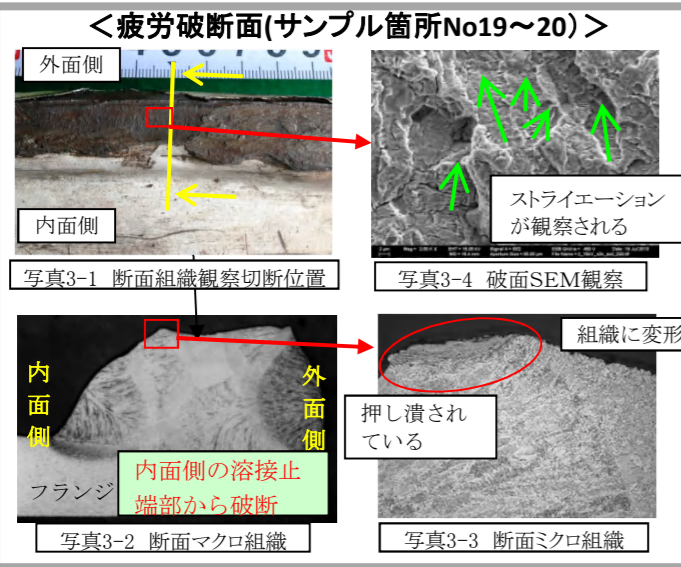


写真3-11 No.22 SEM観察結果

【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、弛みは確認できるが、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ことがわかった。



(2) タワートップボルトの調査

< タワートップボルトの折損等の履歴と点検等の履歴 >

・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度の破損及び弛みが確認されている。最初に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点検に加え、年2回全ボルト数の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か月の間にボルトの折損が確認されている。なお、ボルトの維持管理及び交換はメーカーのマニュアルに従い実施している。

ボルトNo	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					亀裂(ねじ部)
10	取替					
11	取替		折損(ねじ部)	取替		
12	取替		折損(ねじ部)	取替		
13	取替		折損(ねじ部)	取替		
14	取替		折損(ねじ部)	取替		弛み
15	取替		折損(ねじ部)	取替		弛み
16	取替		折損(ねじ部)	取替		弛み
17	折損(ねじ部)		折損(ねじ部)	取替		亀裂(首下)
18	亀裂(ねじ部)		折損(ねじ部)	取替		ボルト無し
19	折損(ねじ部)		折損(ねじ部)	取替		折損(首下)
20	折損(ねじ部)		折損(ねじ部)	取替		亀裂(首下)
21	亀裂(首下)		折損(ねじ部)	取替		亀裂(首下)
22	折損(ねじ部)		折損(ねじ部)	取替		亀裂(ねじ部)
23	取替		折損(ねじ部)	取替		弛み
24	取替		折損(ねじ部)	取替		弛み
25	取替		折損(ねじ部)	取替		弛み
26	取替		折損(ねじ部)	取替		弛み
27			折損(ねじ部)	取替		
28						
29						
30						
ボルト不良	6本 (他に16本弛み)		17本			14本
備考			点検後 約2か月			点検後 約3か月

表3-1 3号機タワートップボルトにおける折損と点検等の履歴

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、チェック間隔を延ばすか目視点検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点検 ※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)
○ ボルト交換時等の手順	記載無し ※締付要領 (配付なし) 原則対角順送り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	年1回フランジ周辺の溶接を丁寧に検査	> 年2回 タワー溶接部を目視点検

表3-2 タワートップボルトの定期点検の内容

(3) 風の評価

< 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) のコンターの一例を図3-1、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。

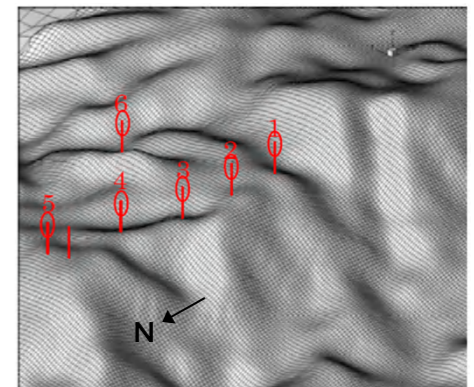


図3-1 風況解析領域図

【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年平均風速は6.52～7.26m/sであり、IECの値よりやや低くなっているが、各号機の部分はほぼ同じである。風向偏角は各号機による違いは殆ど見られず、また、吹上げ角はほぼIECの規定の範囲内に収まっている。風速別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が、風直角方向の乱流強度 (Iv/Iu) と鉛直方向の乱流強度 (Iw/Iu) は共にIECの値を上回っていることが確認された。

その内容を図3-3～5に示す。

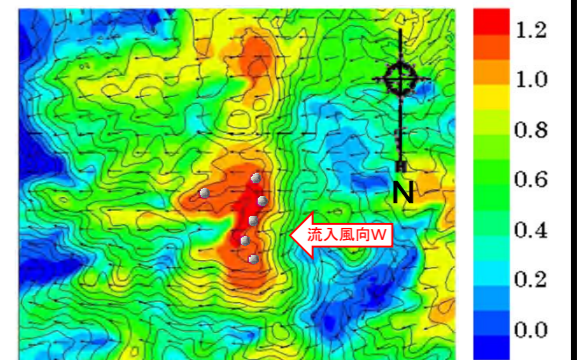


図3-2 無次元風速分布 (流入風向W)

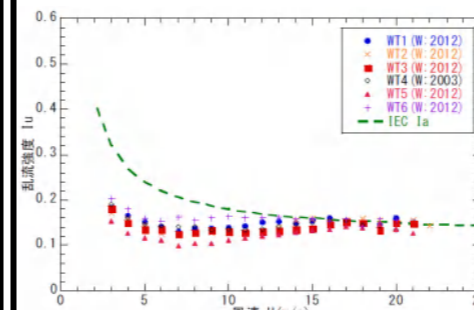


図3-3 風速別乱流強度 (西風)

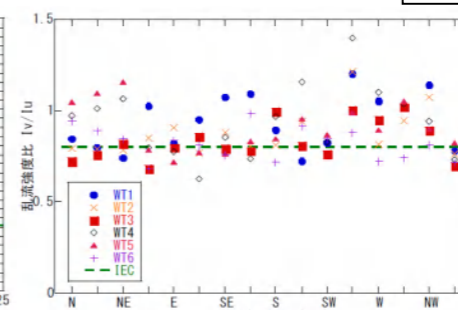


図3-4 Iv/Iuの風向分布

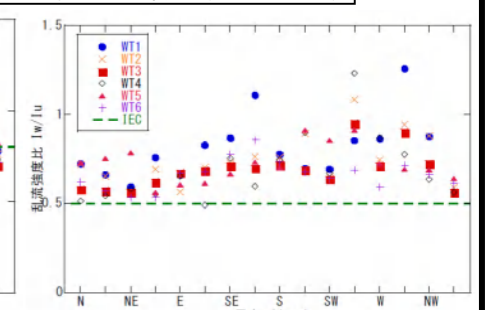
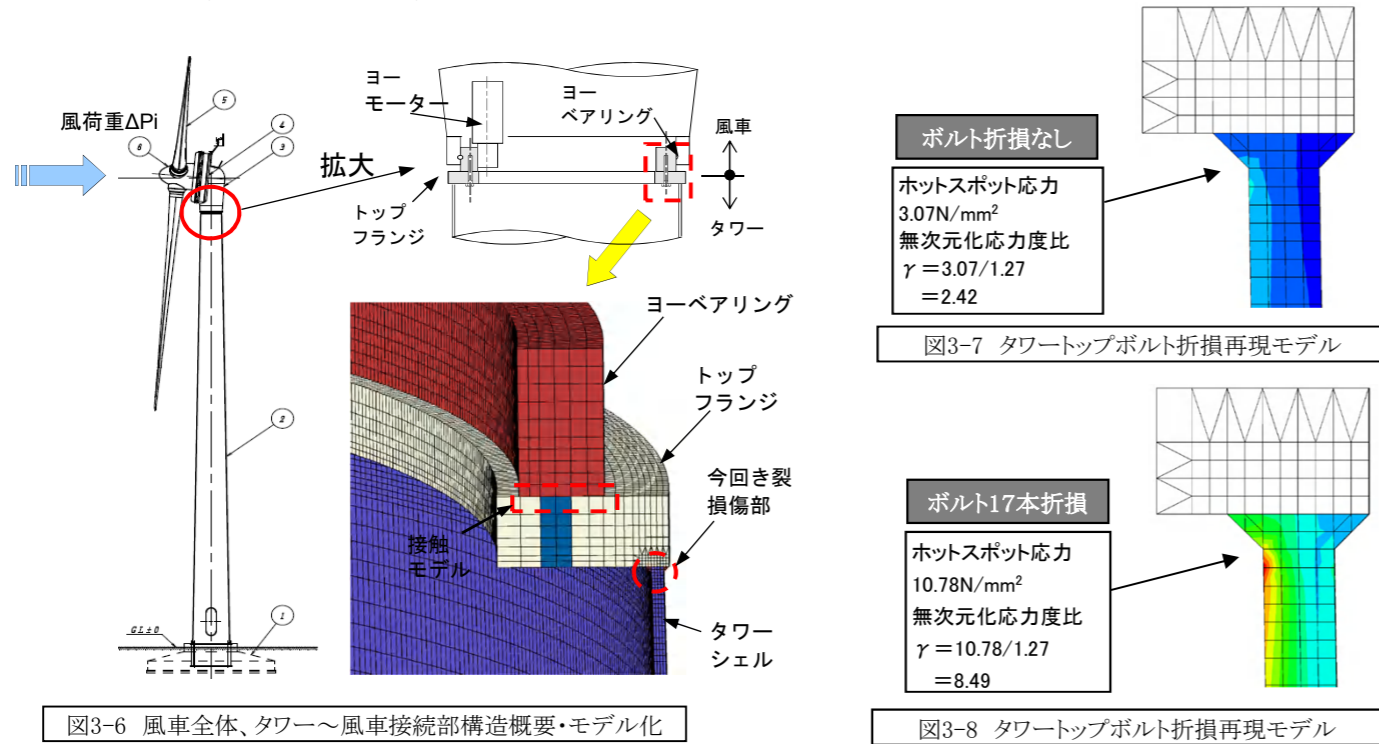


図3-5 Iw/Iuの風向分布

(4) 構造解析の結果

・ボルト折損時のタワー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、ボルト折損によりタワー溶接部の引張応力は、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。

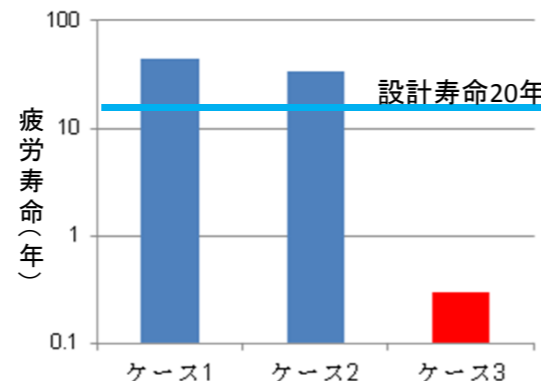


(5) 疲労寿命の検討結果

・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、ナセル脱落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合計約5ヶ月(130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、タワーに疲労亀裂が短期間に発生する可能性を調べた。ボルトの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。

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	0.456	44年
ケース2	ボルト正常 + 現地風の乱れ	0.594	34年
ケース3	ボルト17本折損 + 現地風の乱れ	62.2	0.3年 (約3.6ヶ月)

表3-3 疲労寿命の予測結果



【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の疲労寿命は設計疲労寿命の20年より長く、現地風の乱れを考慮しても、設計寿命内に風車タワーが疲労損傷に至らないことが明らかとなった。
・一方、ボルトが損傷した場合には、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

タワー破断面調査、タワートップボルトの調査、風の評価、構造解析、風応答解析から、事故原因は以下のとおり。

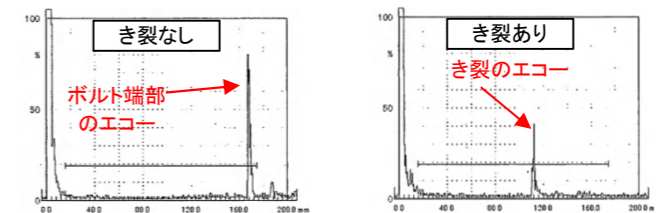
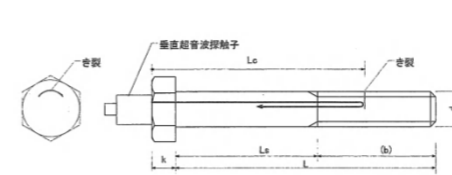
- タワーの溶接止端部近傍の内面で疲労き裂が発生し、疲労破断から延性破断に変化して円周方向に進展し、最終的に全周破断に至り、ナセルが落下した。またタワートップボルトの調査により、事故前約1年の間にボルトの折損が2回発生しており、数か月間に渡って多数のボルトの折損状態であったことが確認された。
- 風の評価、構造解析及び疲労寿命評価の結果から、ボルト17本折損時にはタワー溶接部にボルト正常時の約3.5倍の引張応力が作用し、約3.6か月に疲労損傷に至る結果を得た。ボルト折損時の疲労寿命は、ボルト破損の期間とほぼ一致したことから、当該事故風車のタワーの損傷はボルトの折損により引き起こされたことと推定された。

5. 再発防止策

今回の事故原因の解明結果より、多数のボルトの破損が、今回の事故の原因であることから、ボルトのき裂を早期に検知すること及びボルトの維持管理に重点を置いた再発防止対策を下記のとおり策定した。

(1) 点検方法等の見直し

項目	問題点	対策	実施時期
ボルトき裂の早期発見	現状のマニュアル及び定期点検で実施しているタワートップボルト全数の10%(6本)のトルク確認及び全数の合いマークによる目視確認では、ボルトの緩みを発見するものであり、き裂を発見することはできないことが判明した。 また、亀裂発見時の交換に当たっても施工手順等のマニュアルはなく対策が不十分であった。	超音波探傷試験が有効かつ確実であることから、ボルトの健全性を確認するため、超音波探傷試験を点検項目に追加する。現状の定期点検(年2回)に追加して実施することとし、超音波探傷試験での確認方法は、図5-1及び図5-2に示す。 なお、運転再開後は、3か月を目途に実施し安全を確認する。	1、2、4、6号機 実施済み



(2) 維持管理及びボルト交換時等のマニュアル等の整備

項目	問題点	対策	実施時期
超音波探傷試験による亀裂の早期発見	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ない。 また、早期のき裂を検知することができない。	定期点検に超音波探傷試験を追加して実施する。 実施に当たっては確実かつ適切に実施するためマニュアル整備を行う。	済み (次回点検時実施)
き裂発見時の対応	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弛みを発見した場合は、早期に取替を実施する。ボルト取替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。	済み (次回点検時実施)

6. まとめ

今回のナセル落下事故に関する原因究明では、風応答解析等、各種解析を実施するとともに、タワー及びタワートップボルトの破面調査、破面SEM観察を行った結果、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になった。
現在の定期点検の内容では、ボルトのき裂を発見することができなかったため、ボルトが折損から最終的にタワーが破断することとなった。
これらの事故原因を鑑み、タワートップボルトのき裂を早期に発見するため、超音波探傷を加えた定期点検の実施及び維持管理と施工マニュアルの整備による再発防止対策を策定した。
なお、他号機には疲労き裂がないことを確認しており、今後は、再発防止対策を確実に実行するとともに、風力発電所の安全運転に努めていく。