

ウインドパーク笠取発電所 CK-19 号機風車 ナセル脱落事故について（最終報告）

1. ウインドパーク笠取発電所と事故の概要

(1) サイトの概要

- ・所在地：三重県津市美里町および伊賀市上阿波地内（CK-19 号機は津市美里町）
- ・定格出力：38MW(2,000kW×19 基)
- ・運転開始：第 1 期平成 22 年 2 月 22 日
第 2 期平成 22 年 12 月 15 日（CK-19 号機は第 2 期）

(2) 風力発電設備の概要

- ・風車：(株)日本製鋼所(JSW)社製
- ・定格出力：2,000kW
- ・回転数：19rpm
- ・ロータ：直径 83.3m、取付位置 地上 65m

(3) 事故の概要

- ・推定日時：平成 25 年 4 月 7 日 16 時 37 分～16 時 55 分の間
- ・状況：ロータ過回転によるブレード、ナセルの脱落



図 1 発電所位置図

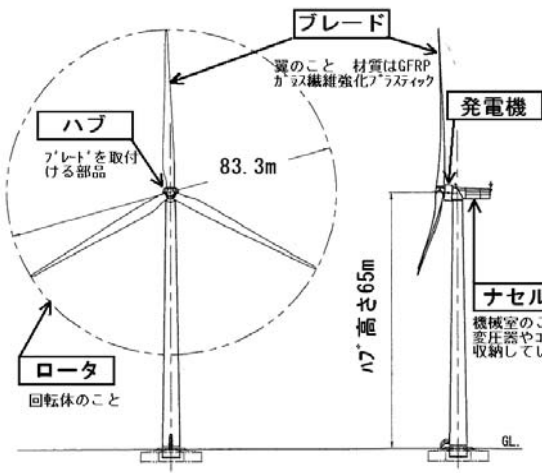


図 2 風車各部の名称

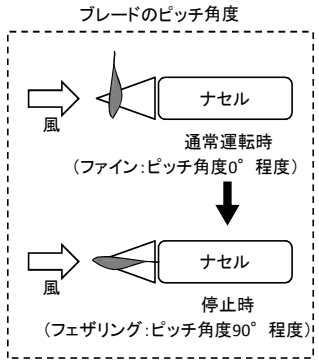


写真 1 ブレード、ナセル脱落状況



2. 事故状況

(1) 気象状況・風況

- ・三重県は 4 月 6 日夕方より発達した低気圧に見舞われ、ウインドパーク笠取においても 7 日未明より風速 20m/s 超過が多々発生し、15 時前後にはカットアウト風速 25m/s となり、16 時 27 分には最大瞬間風速 42m/s を記録。風向は西北西。
- ・事故発生直前(4 月 7 日 16 時 37 分(記録として最終時間))の CK-19 号風車での風速観測データ: 風速 20.67m/s 10 分移動平均風速 27.9m/s

(2) 風車の状況（風速・回転数・ピッチ角の時系列については図 3 参照）

(正常な制御)

- ・15:15:23 カットアウト(3s 平均 30m/s)発生。但し 12:28:45 の時点で運転を停止していた為、ブレードはフェザリング状態。
- ・15:40:27 カットアウト(10min 平均 25m/s)発生。但し 12:28:45 の時点で運転を停止していた為、ブレードはフェザリング状態。
- ・15:56:47 ストームモード(3s 平均 40m/s)へ移行し、風下へ向く様に強制移動開始。(16:02 頃完了 (0.5deg/s))

(事故発生直前の風車状態を示す記録)

- ・16:01:43 ピッチ 1 制御異常が発生。ピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来ず。(風速 27.99m/s、ロータ回転 0.31rpm、ピッチ角 87deg)
- ・16:06:22 ピッチ 3 制御異常が発生。ピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来ず。(風速 32.04m/s、ロータ回転 1.22rpm、ピッチ角 93deg)
- ・16:07:27 ピッチ 2 制御異常が発生。ピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来ず。(風速 37.45m/s、ロータ回転 0.4rpm、ピッチ角 93deg)
- ・16:14:09 フェザリング状態にもかかわらずロータが回転(3rpm 以上)した警報が発生。
- ・16:36:26 ロータ・発電機過回転(ワット上で 24rpm 以上)発生。
- ・16:36:28 ロータ・発電機過回転(ワット上で 26rpm 以上)発生、セーフティチェーン動作。
- ・16:36:34 ヨー旋回方向異常(風向とナセルの向きが不一致)発生。(16:36:29 よりストームモードが維持出来ず風は正対方向へ向う)
- ・16:36:38 ナセル異常振動発生(ナセル内振動計(振子式)の動作(設定値: 0.2G))
- ・16:37:30～33 変圧器地絡故障他多数の故障発生(最後の記録)

(事故発生時のピッチ角、回転数、ナセル方向の変化)

【ピッチ角】

- ・ピッチ 1 制御異常が発生(16:01:43)後、16:13 頃から徐々にピッチ角が 26deg から-187deg となり逆ファイン状態となる。
- ・ピッチ 2 制御異常が発生(16:07:27)後、16:15 頃から急激にピッチ角が 175deg となり逆ファイン状態となる。
- ・ピッチ 3 制御異常が発生(16:06:22)後、急激にピッチ角が 92deg から 176deg となり逆ファイン状態となる。
- ・16:36:28 以降において 3 枚のブレードピッチ角が逆ファイン状態に揃い、過回転状態となる。

【回転数】

- ・16:36:28 に 26rpm を記録し、57 秒後の 16:37:25 には最大回転数 57.78rpm、16:37:33 に 53.19rpm を最終記録した。

【ナセル方向】

- ・15:56:47 にストームモード(自動制御)となり、ダウンウィンド状態になった。
- ・16:36:28 にセーフティチェーン動作後、ヨーの旋回が開始し、アップウィンド状態へと移行し、62 秒後の 16:37:30 には風方向にほぼ正対した。

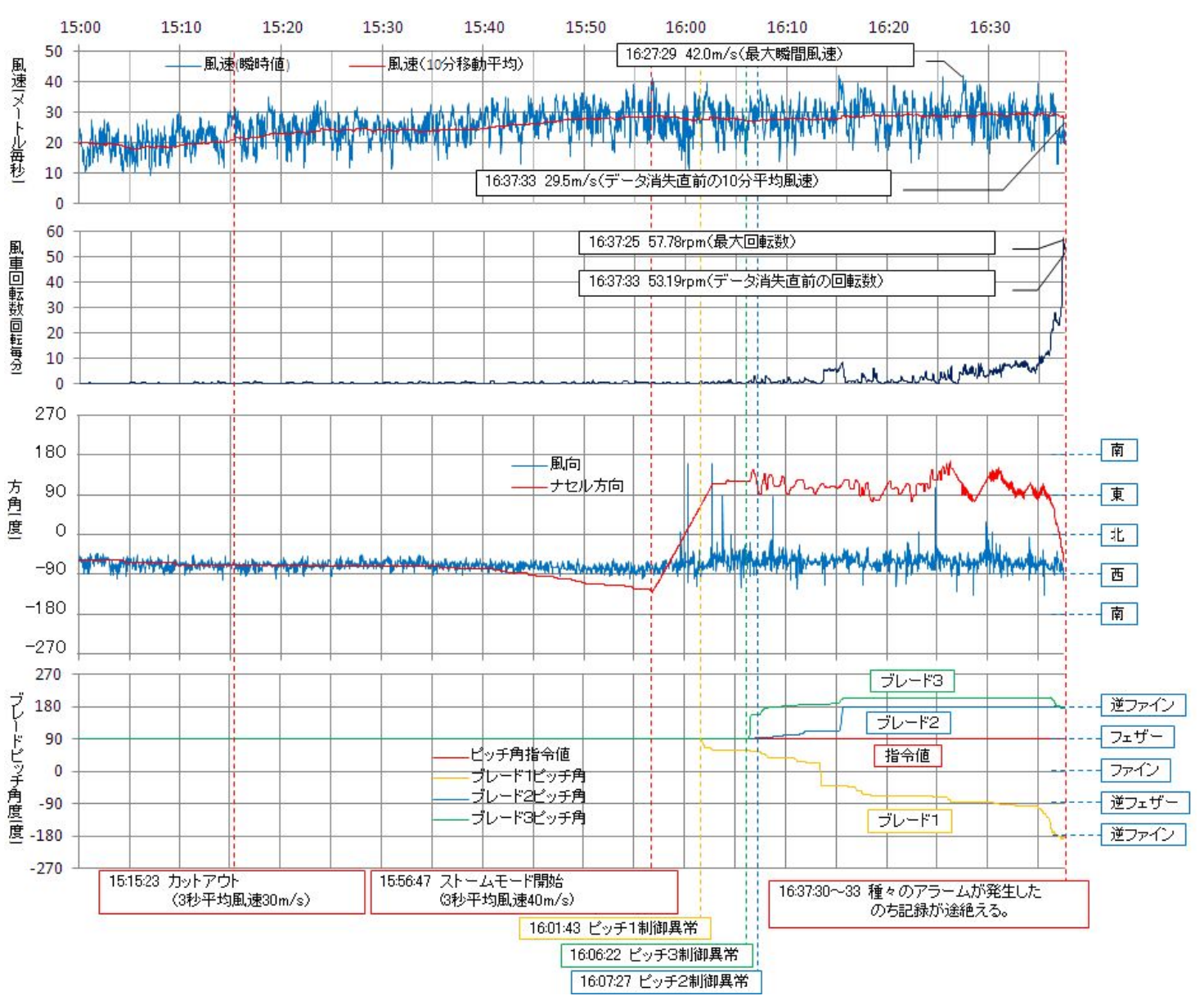


図 3 CK-19 脱落事故までの運転記録

風車の脱落状況

【タワー】

- ・ターはミドルターの中央部付近(地上より 30.6m、38.3mを低部として)の2箇所でブレードが衝突し、風下(東南東)に約 5deg 程度屈曲している。更にター頂部では風上(西北西)に座屈が見られる。
- また、中央部付近から上部には擦傷が見られる。

【発電機及びナセル】

- ・発電機及びナセルはターから風下方向(80deg~90deg)の斜面に脱落している。ナセルとターを接合するフランジ面のボルトは、引張応力(変圧器側)により 37/108 本(約 1/3)が、せん断応力(ハブ側)により 71/108 本(約 2/3)が破壊を確認。

【ブレード】

- ・ブレードは3枚全て表裏が剥離しており原形を留めておらず、第1軸・第2軸・第3軸「ブレード」の特定は不可。
- ・0.5枚×2枚はターに巻き付いた状態、0.5枚はナセル(ハブ)に付いた状態、1.5枚は山中に夫々飛散した状態を確認。

【コンクリート基礎】

- ・僅かにター風下方向に、コンクリートの剥離が見られる。

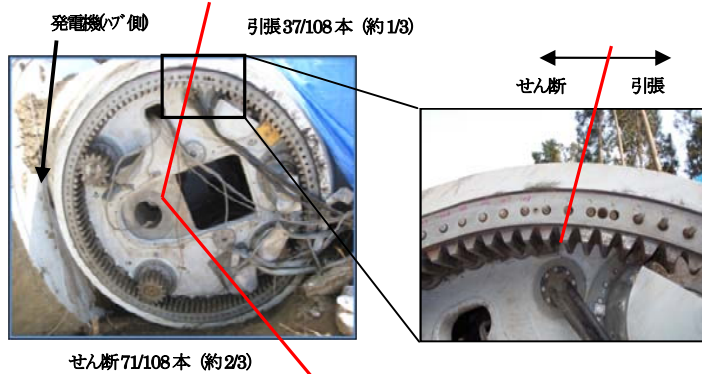


写真2 フランジ面ボルト状況

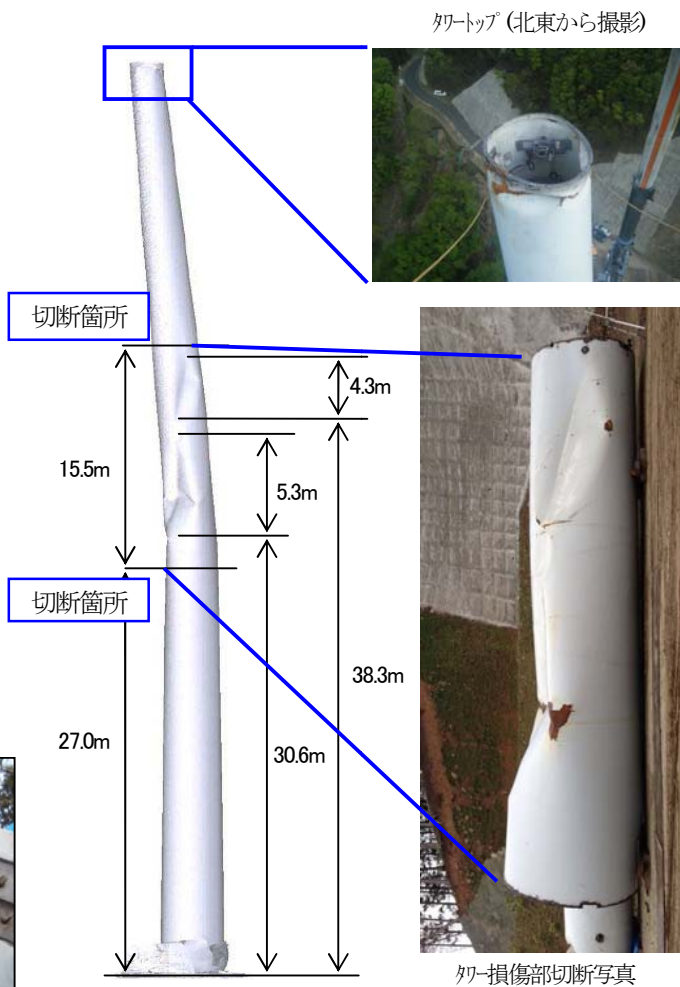


写真3 ター損傷状況

3. 事故原因の究明

(1) 事故に至った要因(事実の確認)

- ① 高風速によりストームモードに移行した後3軸共ピッチ制御異常が発生しピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来なくなり過回転に至った。
- ② ブレードはフェザリング状態が維持出来ず、3枚別々に逆フィン状態へ移行した(制御信号無)。これにより、ローは通常運転とは逆方向に回転し過回転となり、セーフティエン(安全装置)が動作したものの、フェザリング状態には移行せず、ローは反時計方向へ通常の約8倍の速度(設定値 0.5deg/s)にて旋回した。その後、ローは風に正対し通常の約3倍の回転速度(定格回転速度 19rpm)に至った。
- ③ ナセルの接合ボルトは1/3が引張応力、2/3がせん断応力により破壊しナセルが脱落した。ブレード破片は最大約260m程度飛散(小片は約370m)

(2) ピッチモータの分解調査結果と事故原因への考察

運転ログデータよりストームモード時にフェザリング状態が維持できなかったことから、ピッチコントロールシステムの不具合有無について検証するため、事故機からピッチモータを回収し、分解調査を行った。

【調査結果】

- ① ピッチモータブレーキの保持トルク測定結果は最大でも 34.5Nm であり、3台とも規定値の 200Nm^{※3}を下回っていた。
 - ② 3台ともピッチモータブレーキを構成するスプライン(メス側)の歯が三角形状に摩耗しており、その摩耗粉と推定される粉を確認した。
 - ③ スプライン(メス側)は摩耗しているものの、歯山の高さは設計基準値を満足していた。(スプライン自身は空回りしていない。)
 - ④ ブレーキを保持するギャップは 2.0mm~2.4mm であり、3台とも規定値(0.15mm~0.35mm)を逸脱する値であった。
- ※3ピッチモーターメーカーへの購入仕様値であり、設計上必要な値は約 100Nm

調査内容		第1軸	第2軸	第3軸	備考
外観					
		軸・ブレーキ・ファンカバーが変形	モータ冷却フィンの一部が変形	ファンカバーに若干の凹みあり	
モータ駆動試験		軸変形のため、モータ駆動試験は実施せず。	正、逆回転※1とも定格回転数 1,800rpm で駆動可能。	正、逆回転※1とも定格回転数 1,800rpm で駆動可能。異音あり。	※1 正回転(負荷側から見て左回転)、逆回転(同右回転)
ピッチモータブレーキ	保持トルク測定	正回転: 24Nm※2 逆回転: 25.5Nm※2 ※2 軸屈曲状態での計測のため、参考値	正回転: 33.5Nm 逆回転: 34.5Nm	正回転: 20.5Nm 逆回転: 22.5Nm	【規定値】 200Nm 以上 【設計値】 約 100Nm 以上
	ギャップ測定	2.4mm	2.2mm	2.0mm	【規定値】 0.15mm~0.35mm
	スプライン(メス側)外観				
		三角形状に歯が摩耗 歯山高さ: 2.23mm	三角形状に歯が摩耗 歯山高さ: 2.29mm	三角形状に歯が摩耗 歯山高さ: 2.30mm	未使用状態のスプライン 設計基準値: 2.0mm

【スプライン摩耗とブレーキ保持力低下のメカニズム(推定)】

- ① スプラインのオス・メスの歯同士はわずかな隙間(約 0.05mm)を確保して組み立てられており、ブレーキが掛かっている状態でこのわずかな隙間で微振動が発生した。
- ② 微振動が繰り返されることにより、スプライン(メス側)の摩耗が進化した。(オス側よりメス側の材質の硬度が低すぎたため)
- ③ スプラインメス側の摩耗粉がライニングに付着し、ブレーキ動作の都度、ライニングが可動板・固定板と間で摩擦することで、異常な速度でライニングが摩耗した。
- ④ ライニングの摩耗により、ライニング~可動板のギャップが拡大し、スプラインのストロークが長くなったことで可動板を押しつける力が弱まり、ピッチを保持することが出来なくなった。

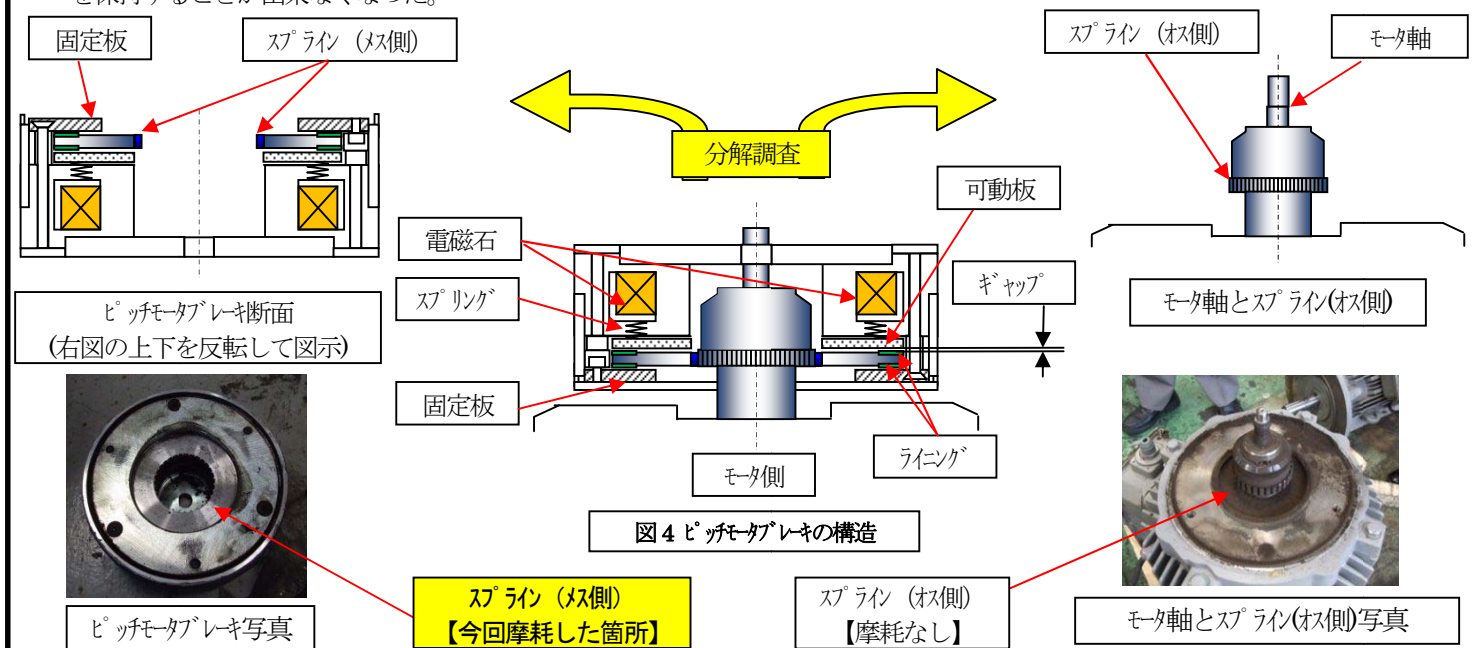


図4 ピッチモータブレーキの構造

③ ナセル・タワー結合ボルトの破損調査と事故原因への推定

【調査結果】

調査ボルト	ハブ側ボルト(#82)	変圧器側ボルト(#19)	備 考
外 観			
破面SEM観察			
評 価	破断部近傍で絞りが認められず、破面は平坦で一定方向の伸長ディンプルが観察されたことから、 せん断方向の過大応力により破断(せん断破壊) したと判断。	破断部近傍で絞れており、傾斜した破面先端方向に向かった伸長ディンプルが観察されたことから、 軸方向の過大応力により破断(延性破壊) したと判断。	疲労亀裂進展に直角な波状模様→ストライエーション(疲労曲面) ストライエーションの例
いずれも金属疲労に特有の断面は観察されなかった。			

【調査結果からの推定】

破面SEM(Scanning Electron Microscope 走査型電子顕微鏡)観察結果から#82ボルトにおいてはせん断破壊、#19ボルトにおいては延性破壊と推定され、繰返し荷重による疲労破面は観察されなかったことから、ボルトの破断は金属疲労ではない。従って、今回のナセルの落下は金属疲労によるものではない。

④ 風応答解析

事故原因を解明するため、風応答解析等各種解析を実施した。ここで風応答解析とは実機と同様の動作を行うモデルに風を流入させ、風車各部に作用する荷重を評価する解析である。

【モータブレーキに働くトルクの解析】

実機ログデータより風速、風向、ブレード3本のピッチ角を入力して、モータブレーキに働くトルクを求めた。風荷重により各ブレードに発生するピッチモータの解析値から、ピッチベアリングの抵抗とデューサ(減速機)の損失を差し引き、ブレーキに働くトルクを計算すると、モータブレーキに働くトルクは約12Nm～47Nmであった。実機ログデータから概ね27Nm以上のトルクが作用した場合にピッチ角が変化しており、この値は回収したピッチモータ分解調査で測定した保持トルク(20.5Nm～34.5Nm)とほぼ一致した。

【ロータが過回転に至った原因の解明】

本事故ではピッチ角が変化し始めたブレードが、風の流れに対して多少の角度を保持した状態でロータが回転している。解析の結果、ある程度ブレーキ保持力が残存している場合には、3本のブレードは回転方向に対する抵抗が最も小さい位置で状態を保持する様になり、ロータは回転を継続する。更に回転数が上昇して行くとブレードが3枚とも逆フィンの角度に移行し、過回転に至ることを確認した。

【事故直前の過回転およびタワーヒットの検証】

実機ログデータより風向およびブレード3本のピッチ角を入力とし、過回転に至るロータ回転数及びブレードの挙動を求めた。なお、解析の入力風速は解析対象時刻における、風速の瞬時値を一定風速として与えた。解析結果では、ロータ回転数は最大60rpmに達し、記録データとほぼ一致した。

16:36:28には、ナセルブレードピッチ角のばらつきから発生した振動による回転力および風圧等の外力により旋回を始め、62秒後に風方向にほぼ正対したと推測される。風車が風に正対しブレードが逆フィン状態になり、ロータが過回転になったために、ブレードはタワーに近づく方向へ変位した。解析結果から事故直前の16:37:33におけるブレードの変位量は、図5に示すとおりブレード1は13.8m、ブレード2は10.6m、ブレード3は5.5mとなった。よって、ブレード1およびブレード2はタワーに衝突する可能性が高い。(無風時の逆フィン時には、ブレード先端とタワーとの距離は約5.3mである)

風応答解析によるブレードが衝突する位置予測と、実機が損傷した①部位の位置関係は、図5の様にほぼ一致することを確認した。但し、②部位は、①にブレードが衝突した事によりナセルが落下しながら回転したブレードが衝突したと推察される。

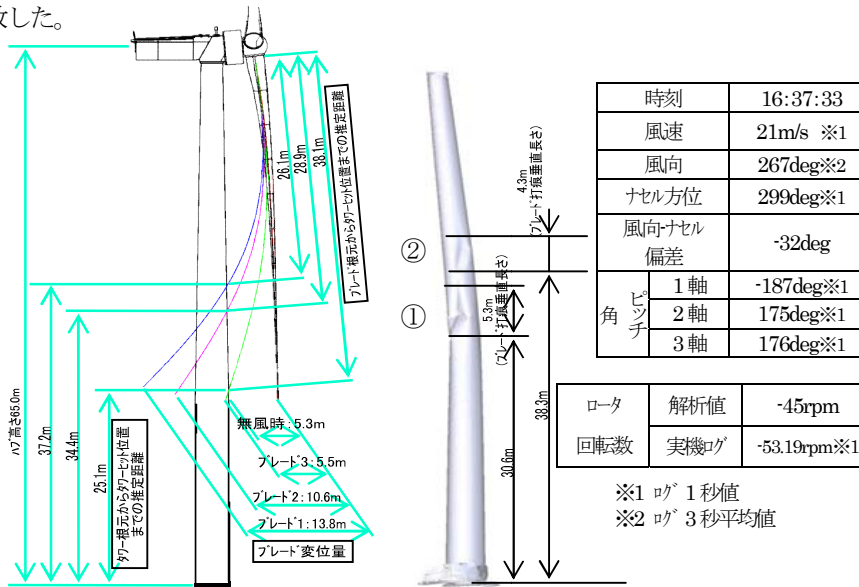


図5 過回転時におけるブレード変位量とタワーヒット位置関係と計測結果

4. 事故原因のまとめ

ピッチモータ分解調査、ナセル・タワー結合ボルト破損調査および風応答解析から、事故原因としては以下のとおり。

- ピッチモータブレーキを構成するスプラインが不適切な材質で製造されたため、スプラインの異常摩耗が発生し、ブレーキインゲが摩耗したことにより、3枚のブレードともピッチ角を保持するブレーキ力が規定値を下回った。これにより、強風時にフェザリング状態を保持出来なくなり3枚のブレードが同時に逆フィンになったことで、ロータの過回転が発生した。尚、ピッチモータブレーキの保持力低下を事前に検知する機能は無かった。
- ロータ過回転によりブレードが変形し、ブレードがタワーに接触し、ナセルとタワーを結合するボルトに設計荷重を超えるせん断応力および引張応力が作用したことにより、ボルトが破断し、ナセルが脱落した。
- 過回転が発生した場合に風車を停止するための機能として安全回路(セーフティチェーン)が設けられていたが、この機能はピッチモータブレーキが正常であることが前提条件として設計されており、今回のようなピッチモータブレーキに異常がある場合は機能できず、過回転防止機能として不十分であったことが判明した。

5. 再発防止対策

今回の事故原因の解明結果から、過回転を防止する為の再発防止対策を下記のとおり策定した。

- ピッチモータブレーキを構成するスプラインの材質選定
 - アルミ合金製より摩耗強度(硬度・引張強度)の高いステンレス製を選定する。
 - 摩耗寿命耐久試験としてアルミ合金製とステンレス製で、ACサーボモータにトルク制限を掛けた状態で、正逆運転させた際の、スプラインのカタ(角度)の変化を確認する。100万回繰返し負荷試験を実施し、ステンレス製の検証を行った所、アルミ合金製と比較してステンレス製は7倍程度の耐久性が有ると判断された。よって、摩耗に対する寿命が単純に7倍になったものと考え、ウインドパーク笠取での実績(1年6ヶ月)から従来よりも耐久性が大幅に改善され、摩耗寿命が10年程度と想定しステンレス製を採用した。今後は消耗品としての位置付けで管理する。
 - ピッチモータブレーキの健全性を確認するため、6ヶ月毎にギャップ測定を実施して状態を観察し、その結果に従い適切な処置を行う様に点検マニュアルを整備する。
- ピッチモータブレーキの性能を維持するための整備(予防保全)

ピッチモータブレーキ保持力が正常であることを確認するため、ブレーキを掛けた状態にてモータに所定のトルクを掛け、モータが動かないことを確認する。実施は自動プログラムにて適宜(当初は1週間に一度)低風速時に、フェザリング状態にて1軸毎行う。更に、低気圧(台風を含む)通過前等あらかじめ強風が予想されるときおよび通過後には、適宜手動にて実施し、ブレーキ保持力が正常であることを確認する。

③ 過回転防止措置

風車がフェザリング状態で待機しているにもかかわらず、ロータ回転数が許容回転数(3rpm)を超えた場合、発電機をモータ駆動させ、ロータの回転数を抑える様に自動制御を付加する。

問題点		対 策	実施時期
1	スプライン材質の選定誤り	<1-1.ピッチモータブレーキを構成するスプラインの材質変更> ・耐摩耗性の低い、或いはブレーキ力の低いピッチモータブレーキは、スプラインの材質をアルミ合金製からステンレス製へ変更し取替える。	済(～4/27)
		<1-2.定期点検マニュアルの整備> ・6ヶ月に一度の定期点検時に、ギャップ測定等の項目を追記する。	済(～5/31)
2	ピッチモータブレーキの保持力低下	<2.ピッチモータのブレーキ保持力のチェック機能追加> ・ピッチモータのブレーキ保持力が正常であることをモータに所定のトルクを掛け、ピッチが動かないことで確認する。実施は自動プログラムにて適宜(当初は1週間に一度)、低風速時(3m/s以下)に、フェザリング状態にて1軸毎行う。 ・低気圧(台風を含む)通過前後等は適宜、上記プログラムを手動にて実施し、ブレーキ保持力が正常であることを確認する。	～6末
		<3.回転数制御によるロータ過回転防止機能追加> ・風車がフェザリング状態で待機しているにもかかわらず、ロータ回転数が許容回転数(3rpm)を超えた場合、発電機をモータ駆動させ、ロータの回転数を抑える様に自動制御を付加する。	～6/21

※ 再発防止対策のうち1-2、2、3についてはWP笠取全号機に水平展開いたします。

6. まとめ

今回のナセル脱落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、風車制御のログの解析、ピッチモータブレーキの分解調査、ボルトの断面SEM観察を行った結果、不適切な材質で製造されたピッチモータブレーキのスプラインが異常摩耗し、その摩耗粉によりブレーキインゲが摩耗したこと、3枚のブレードともピッチ角を保持するブレーキ力が規定値を下回ったことが、直接的な原因であることを明らかにした。

強風時に3枚のブレードが同時に逆フィンとなったことでロータの過回転が発生し、それによりブレードが大きく変形した。その結果、ブレードがタワーに接触し、ナセルとタワーを結合するボルトに設計荷重を超えるせん断応力および引張応力が作用したことにより、ボルトが破断し、ナセルが脱落した。

これらの事故原因を鑑み、耐摩耗性の高いスプラインへの交換、ピッチモータブレーキ保持力のチェック機能の追加、過回転防止機能の追加等の再発防止対策を策定した。

今後は、再発防止対策を確実に実行するとともに、風力発電所の長期に亘る安全運転に努めていく。