

ウインドパーク笠取発電所19号機 ナセル脱落事故について

4月7日（日）に発生した当社ウインドパーク笠取19号機のナセル脱落事故につきましては、皆さまにご迷惑とご心配をお掛けし、心からお詫び申し上げます。

事故発生後、原因究明を進め、5月2日に、中部近畿産業保安監督部に原因および対策等に関する報告書を提出しました。（※5月2日公表済み）

その後、さらに事象の検証や再発防止策の検討を進めてまいりましたが、6月18日に、中部近畿産業保安監督部に最終報告を提出しましたので、ご報告申し上げます。

5月2日 公表内容

(1) 事故発生に至る状況

- ・瞬間風速 40m/秒を超える強風下で、3枚のブレードのピッチ角が変化し、フェザリング状態を維持できなくなり、風車が回転し始める。
- ・3枚のブレードが風を受ける位置に変化。回転数が急上昇、定格回転数の約3倍の57.78回転/分に至る。多数の異常警報後、記録が途絶える。

(2) 事故原因

- ・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擦が発生し、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の5分の1以下に低下。これにより、フェザリング状態を維持できなくなり、3枚のブレードが同時に風を受ける形になったことで、ロータの過回転が発生した。
- ・ロータの過回転により大きく変形したブレードがタワーに衝突した可能性が高く、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、ボルトが破断し、ナセルが脱落。
- ・風応答解析から、事故時の風条件においてピッチモータブレーキに作用する風荷重がブレーキ力を上回り、ブレードのピッチ角を保持できなくなったことが判明。

(3) 当面の措置

- ・ウインドパーク笠取の全風車（18基）のピッチモータブレーキについて、早急に点検を行い、健全性を確認するとともに、耐摩耗性の低い、あるいは、ブレーキ力の低いピッチモータブレーキを取り替える。

(4) 今後の課題

- ・事故原因であったピッチモータブレーキの安全性向上のために、ピッチモータブレーキの点検マニュアルを整備するとともに、ブレーキの監視方法やフェザリング状態におけるピッチ角の保持方法などの再発防止策を検討する。

6月18日（本日） 最終報告書の概要

1 事故原因の究明

今回の事故原因については、下記の3点について原因究明を行った。

- ① ストームモード時（強風時に風を避けるよう風下にナセルを回転した状態）にブレード角度を風の影響を避ける状態（フェザリング状態）が維持できなかったため、事故機からピッチモータを回収し、ピッチコントロールシステムの不具合の有無について原因究明を行った。
- ② 3月に発生した他サイトのナセル脱落事故の原因と共通性がないか確認するため、ナセル・タワートップ結合ボルトの破断面を観察し、破断原因を究明した。
- ③ 運転ログデータをもとに、事故直前の風車挙動を模擬した風応答解析を行い、ブレードに作用した荷重や過回転時のブレード変位置を究明した。

2 事故原因のまとめ

調査解析を進めた結果、次の3点を事故原因と特定した。

- ①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素材（アルミ合金）でできており、その摩耗によって発生した摩耗粉によりブレーキライニングが摩耗したことにより、3枚のブレードともピッチ角の保持力が規定値を下回り、3枚のブレードが同時に逆ファインになったことで、ロータの過回転が発生した。
- ②ロータの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。
- ③過回転が発生した場合に風車を停止する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、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は不十分であったことが判明した。

3 再発防止対策

今回の事故原因の解明結果から、問題点を検討し、過回転を防止するための再発防止策を下記のとおり策定した。

問題点		対策	実施時期	
1	ピッチモータブレーキの保持力低下	スプライン材質の選定誤り	<p><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></p> <ul style="list-style-type: none"> ・耐摩耗性の低い、あるいはブレーキ力の低い、材質がアルミ合金製のスプラインは、ステンレス製に取替（※1～10号機は鋼製であり異常がないため取替せず。11～18号機は全て取替） 	取替済
			<p><1-2.定期点検マニュアルの整備></p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 	整備済
2	ピッチモータブレーキの性能維持が不能	<p><2.ピッチモータブレーキ保持力のチェック機能追加></p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。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軸ごとに実施 ・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、ブレーキ保持力が正常であることを確認 	～6月末	
3	過回転防止機能の不足	<p><3.回転数制御によるロータ過回転防止機能追加></p> <ul style="list-style-type: none"> ・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（3回転/分）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自動制御機能を付加する 	～6月21日	

※再発防止対策のうち、1-2,2,3については、ウインドパーク笠取の全号機に水平展開する。

今後は、再発防止対策を確実に実施するとともに、今回の事故で得られた知見を十分に踏まえ、風力発電所の安全運転に努めてまいります。

<添付資料>

- ・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（ご報告）

<お問い合わせ先>

株式会社シーテック 総務部 久野、梶田、林（052-852-6997）

以上

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（ご報告）

1. 風車損壊に至った推定プロセス

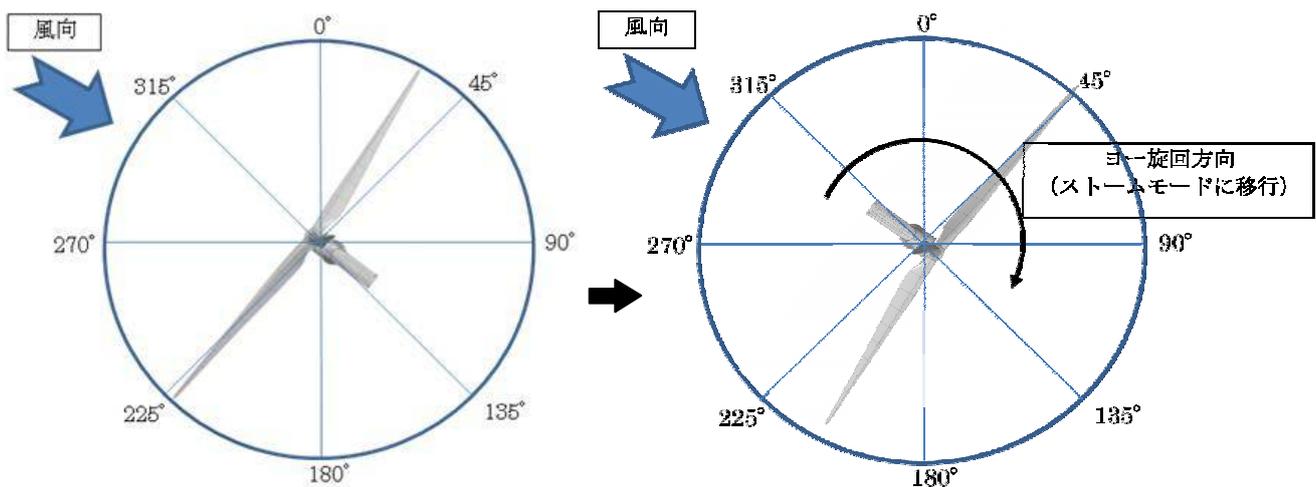
風車損壊原因を解明するため風応答解析を行って、これまで得られているデータや事故様相と比較しながら次のようなプロセスで損壊に至ったと推定した。

- (1) ブレード 1～3 は当初風の力を受け流し安定した状態を保つフェザリング状態にあった。

※風車の回転は、機械的ブレーキではなく ブレードのピッチ角度をフェザリングにすることで停止する。フェザリング状態は図 2 を参照のこと。

- (2) 瞬間風速 40m/s に風が強まったことにより、ナセルはストームモードに移行した。（図 1 参照）

移行中および移行後に、ブレードのピッチ角が流入風およびロータ回転による風荷重により変化し始めた。



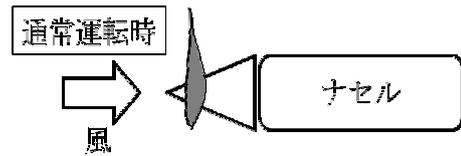
※風車を上から見た図（ヨー：ナセルを風向に合わせて位置変化させる装置）

※通常運転時の風車回転方向は風上から向かって時計回り

図 1 フェザリング状態からストームモードに移行

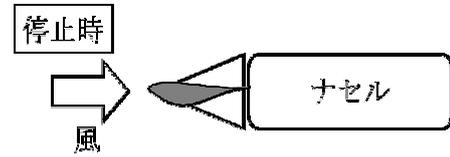
※ブレードは、ブレード 1、ブレード 2、ブレード 3 の 3 枚のブレードが有る。

(3) ピッチ角度（ブレードの風向に対する角度）の空力バランスによりロータが逆回転（推定）を始める。ロータ方向は風下を維持していた。



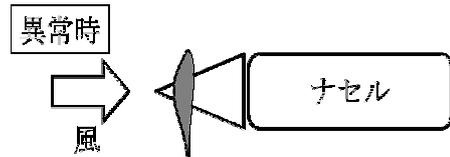
(ファイン：ピッチ角度0°程度)

(4) 流入風およびロータ回転による風荷重により、3本のブレードピッチ角が逆ファイン位置に移行、ロータ回転数が上昇し過回転となった。
(図2参照)



(フェザリング：ピッチ角度90°程度)

(5) ブレード毎のピッチ角のアンバランスにより振動が発生しナセルが風に押されることで、ヨーが風上側へと旋回を開始した。



(逆ファイン：ピッチ角度180°程度)

(6) ロータ回転数の上昇と共に、ナセルが風上側へ旋回してブレードは風にはほぼ正対する形になった。(図1のフェザリング状態と同じ方向)

図2 ブレードのピッチ角度

(7) この時のブレードのタワーに対する向きは、ピッチ角度が逆ファインであったことからブレードの先端はタワーに近づく側にあった。

※ブレードの先端は、通常運転時（図2参照）にタワーから離れるように、予め曲げられた形状になっている。

(8) ロータが風にはほぼ正対となり、流入風と回転による揚力によってブレードはタワーに近づく方向に大きく変位し、タワーに衝突することで破砕した。

(図3参照：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の部位の位置関係はほぼ一致することを確認した。ただし、②の部位は、ナセルが落下する際に回転していたブレードが衝突した跡と推察される。)

(9) タワーに衝突した衝撃荷重により、タワーの中心を軸にナセルが回転するトルク（回転軸の周りに働く力のモーメント）が発生した。

(10) 発生したトルクがナセルとタワーとの結合ボルトに作用して、ボルトのせん断強度を超えるせん断応力（物体の断面でお互い反対方向にずれさせるように作用する力）により破断した。(図4参照)

(11) ナセルとタワーとの結合ボルトの破断によりナセルが落下した。この時のナセルの移動および落下に伴い残っていたボルトは、引張り荷重により破断した。また、ブレードはタワーに巻き付く形で地上に落下した。

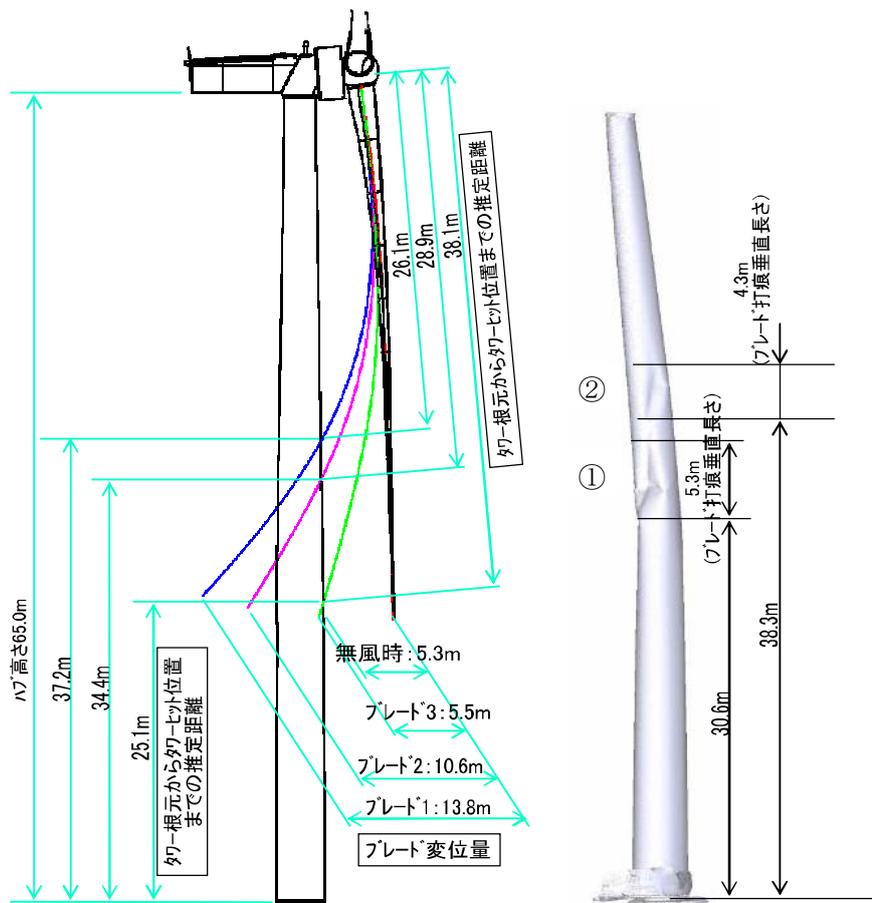


図3 過回転によるブレード変位置解析と実際のタワー衝突位置

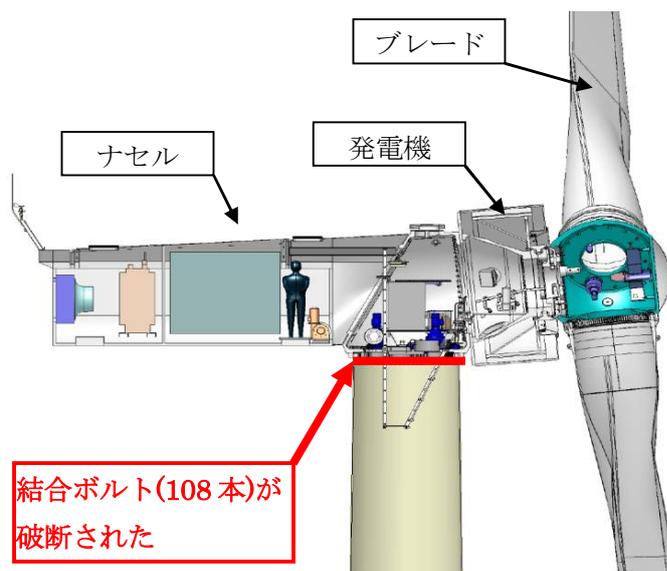


図4 ナセルとタワーの結合ボルト位置



タワー頂部損壊状況1



タワー頂部損壊状況2



タワー中間部～基礎部、ブレード損壊状況



タワー中間部損傷部

タワー最下部、ブレード損壊状況



写真1 タワー損傷状態

2. 事故原因

5月2日の中間報告で事故原因を推定したが、風応答解析など各種解析を実施するとともに、風車制御ログの解析、ピッチモータブレーキの分解調査、ボルトの断面SEM観察を行い、今回の事故原因を次のとおり特定した。

- (1) 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ていたため、スプラインの異常摩耗が発生し、ブレーキライニング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できなくなり3枚のブレードが同時に逆ファインになったことで、ロータの過回転が発生した。
- (2) 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り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。
- (3) 過回転が発生した場合に風車を停止する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を前提条件として設計されており、今回の様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だったことが判明した。

したがって、これらの事故原因を鑑み、再発防止対策は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として具体策をまとめた。

3. 再発防止対策

今回の事故原因の解明結果から、問題点として挙げられるのは、ピッチモータブレーキの保持力が低下していたこと、過回転を防止するための機能が不十分であったことが挙げられる。このため次のような再発防止策を策定した。

- (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
 - ・ピッチモータに使われているスプラインの材質としてアルミ合金製より摩耗強度の高いステンレス製を選定し、予防措置的に暫定措置として取替えた。（取替済み）
 - ・その後、摩耗寿命耐久試験を行なった結果、アルミ合金製と比較してステンレス製は7倍程度の耐久性があり、これは現地の実績を考慮すると10年程度の耐久性があると想定し、恒久対策としてステンレス製を採用する。
- (2) 定期点検マニュアルの整備

ピッチモータブレーキの健全性確認のために、今までの3年に1度の定期点検を6カ月に改めて、ギャップ測定を実施して適切な処置が行えるような点検マニュアルを整備した。（整備済み）
- (3) ピッチモータのブレーキ保持力チェック機能追加
 - ・ブレーキをかけた状態でモータに所定のトルクをかけ、モータが動かないことでブレーキ保持力が正常と判断する。実施にあたっては自動プログラムで適宜（当初は1週間に1度）、低風速時（3m毎秒以下）にフェザリング状態にて1軸毎行う。なお、低気圧通過前時等あらかじめ強風が予想される時および通過後には適宜、自動プログラムでなく手動で行う。（6月末までに実施予定）

(4) 回転数制御モード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値（3rpm）を超えた場合に、発電機をモータとして扱うことでロータ回転数を抑えるように自動制御を付加する。

（6月21日までに実施予定）

今後は、再発防止対策を確実に実施するとともに、今回の事故で得られた知見を十分に踏まえ、風力発電所の長期にわたる安全運転に努めてまいります。

<お問い合わせ先>

㈱シーテック 総務部 久野、梶田、林（TEL 052-852-6997）

以 上

【ウインドパーク笠取 ナセル脱落事故調査委員会】

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

(報告書)

平成 25 年 6 月 4 日

株式会社 シーテック

目次

1. はじめに.....	1
2. ウインドパーク笠取と事故の概要.....	2
(1)ウインドパーク笠取の概要.....	2
(2)事故の概要.....	7
3. 事故状況.....	13
(1)事故発生時の気象状況・風況.....	13
(2)事故発生時の風車状況.....	13
(3)事故状況.....	18
4. 設備メンテナンス状況の確認.....	20
5. 事故原因の究明.....	21
(1)事実の確認.....	21
(2)方針.....	21
(3)CK-19号機ピッチモータの分解調査結果と事故原因への考察.....	22
(4)ナセル・タワー結合ホルトの破損調査と事故原因への考察.....	26
(5)風応答解析.....	27
6. 事故原因のまとめ.....	33
(1)ナセル落下に至る過程.....	33
(2)事故原因.....	34
7. 再発防止対策.....	35
(1)既設18基のピッチモータブレーキの点検と対策品への交換.....	35
(2)ピッチモータブレーキの性能を維持するための点検マニュアルの整備.....	36
(3)ピッチモータブレーキ保持力のチェック機能追加.....	36
(4)回転数制御によるロータ過回転防止機能の追加.....	37
8. まとめ.....	40
【ウインドパーク笠取 ナセル脱落事故調査委員会 名簿】.....	41
【ウインドパーク笠取 ナセル脱落事故調査委員会 開催実績】.....	42

1. はじめに

平成 25 年 4 月 7 日にウインドパーク笠取風力発電所の 2,000kW 風力発電設備 19 基の内、1 基(CK-19 号)においてナセル、ブレード、ハブ、発電機が脱落する事故が発生した。

幸いにも人的な被害はなかったものの、当社は今回の脱落事故の重大性に鑑み、ウインドパーク笠取の全風車の運転を停止するとともに、事故調査委員会を組織して社外学識者・専門家のご指導をいただきながら、事故原因の究明と再発防止策の検討を進めてきた。

事故原因の究明にあたっては、現地事故状況の把握、残された運転ログデータ分析、事故の起因となったピッチモータブレーキの調査等を行うとともに、風応答解析によるブレードに作用するモーメント算出や過回転時のブレード変化量の算出を実施し、委員会にて評価・検討を行った。

これまでの調査・評価検討の結果、原因究明および再発防止策の立案が完了したことから、これらを調査報告書としてまとめた。

今後は立案した再発防止策を着実かつ速やかに実施するとともに、更なる安全の向上に努め、社会から安心・信頼される事業運営を目指していきたい。

2. ウインドパーク笠取と事故の概要

(1) ウインドパーク笠取の概要

ウインドパーク笠取(以下 WP 笠取という)の風車レイアウトを図 2-1 に示す。

WP 笠取は三重県津市美里町および伊賀市上阿波地内に出力 2,000kW の風車 19 基を設置し、平成 22 年 2 月 22 日(第 1 期工事, 10 基)および同年 12 月 15 日(第 2 期工事, 9 基)に運転を開始した総出力 38,000kW のウインドファームである。

WP 笠取で採用した風力発電設備の基本諸元を以下に示す。

【基本諸元】

- 風車製造者:株式会社 日本製鋼所
- 種類:プロペラ型 アップウインド式
- 出力:2,000kW(多極同期発電機)
- 定格回転数:19rpm
- ロータ:直径 83.3m, フレート長 40.0m, フレート枚数 3 枚
- ヨー制御:アクティブヨー制御(電動)
- ピッチ制御:可変ピッチ制御(電動)
- ハブ中心高さ:地表面から 65.0m
- 支持物:鉄塔

風車外形図を図 2-2 に示す。また、風力発電設備の各部位の名称を図 2-3 に、プレート・ナセルの状態について図 2-4 に示す。

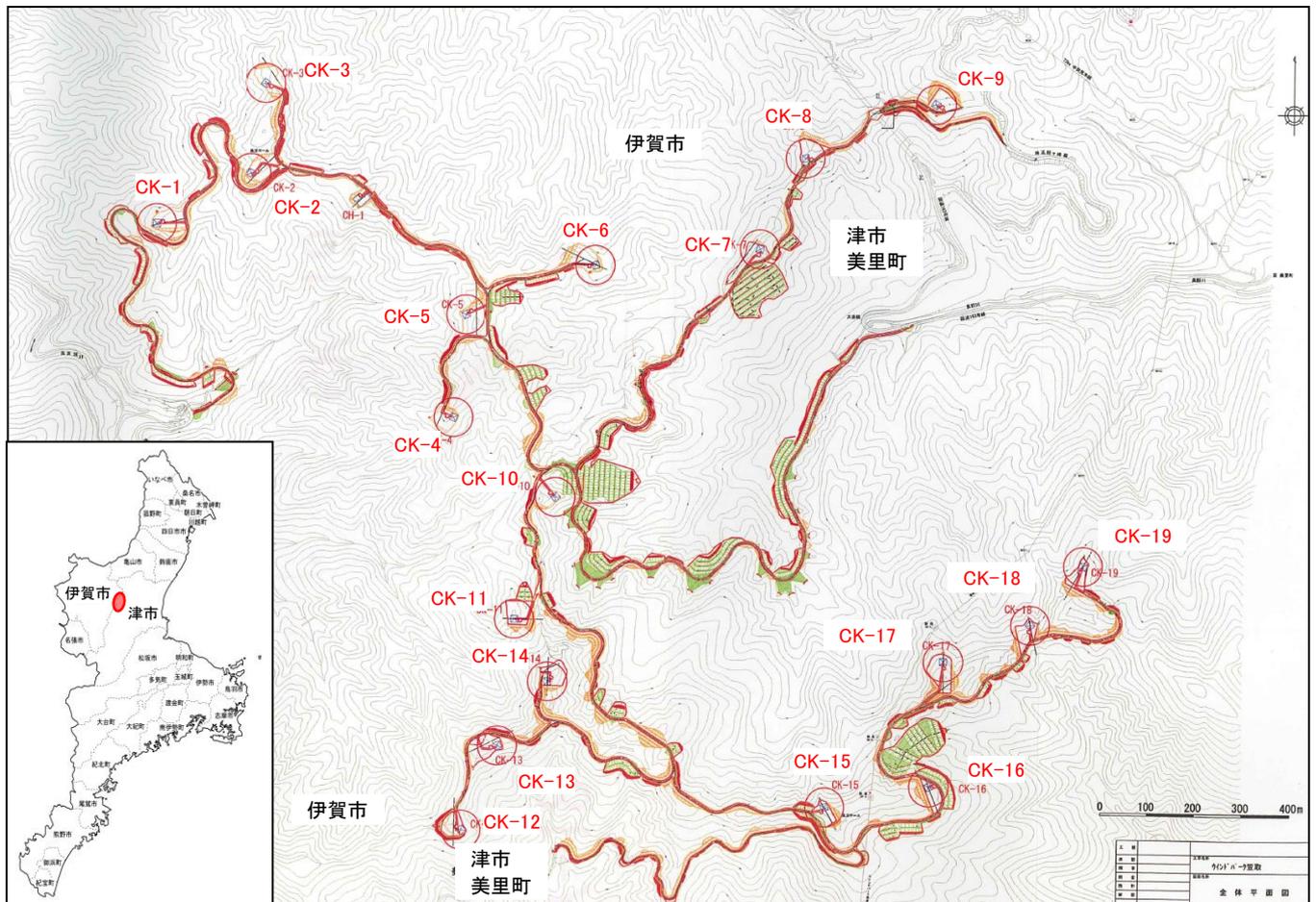


図 2-1 風車レイアウト図

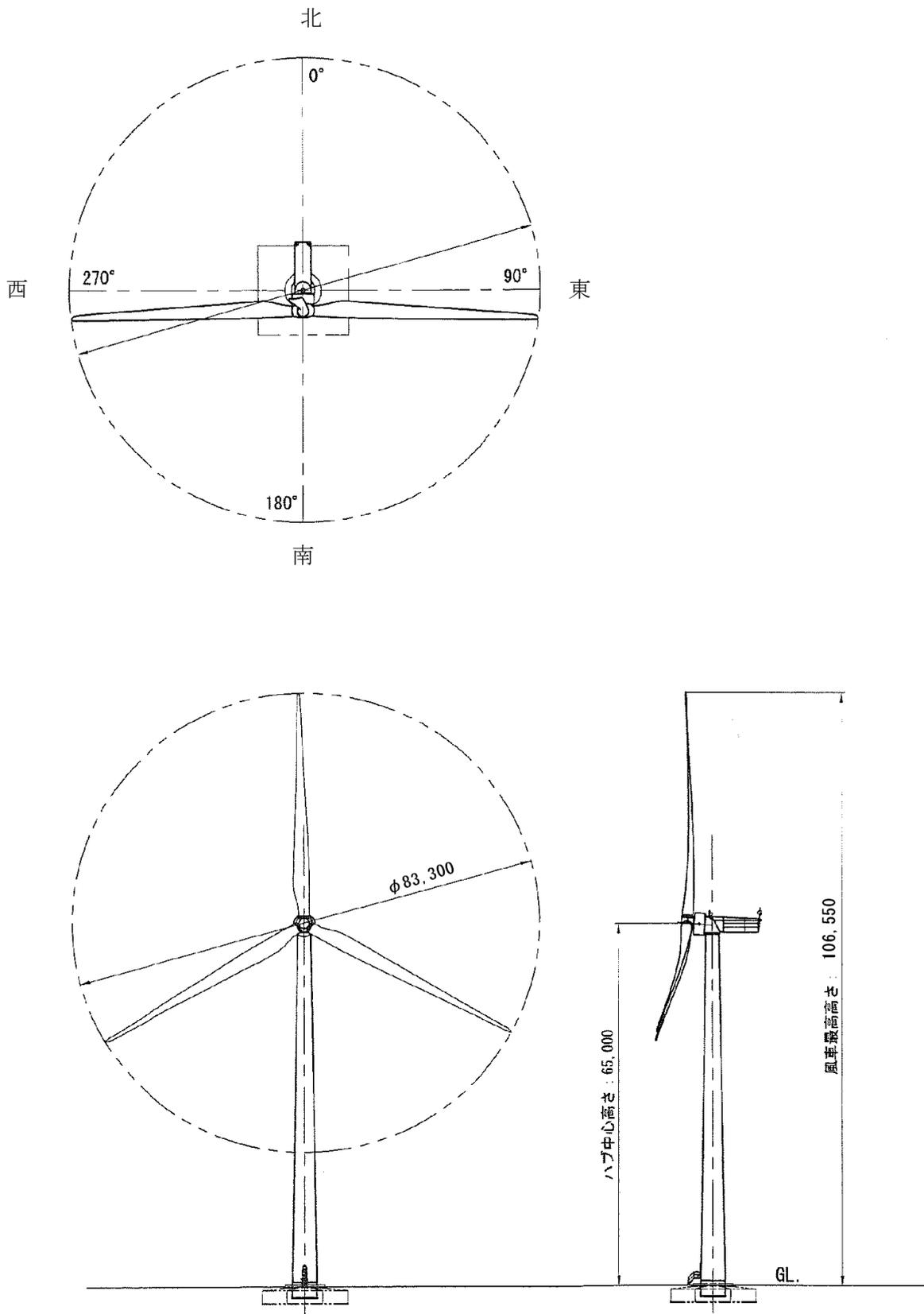


図 2-2 風車外形図

※注釈:本報告書ではナセル角と風向角の表記は、360deg 表記とする方法を用いている。0deg を中心としてマイナス側の表記は、-90deg=270deg にて示す。

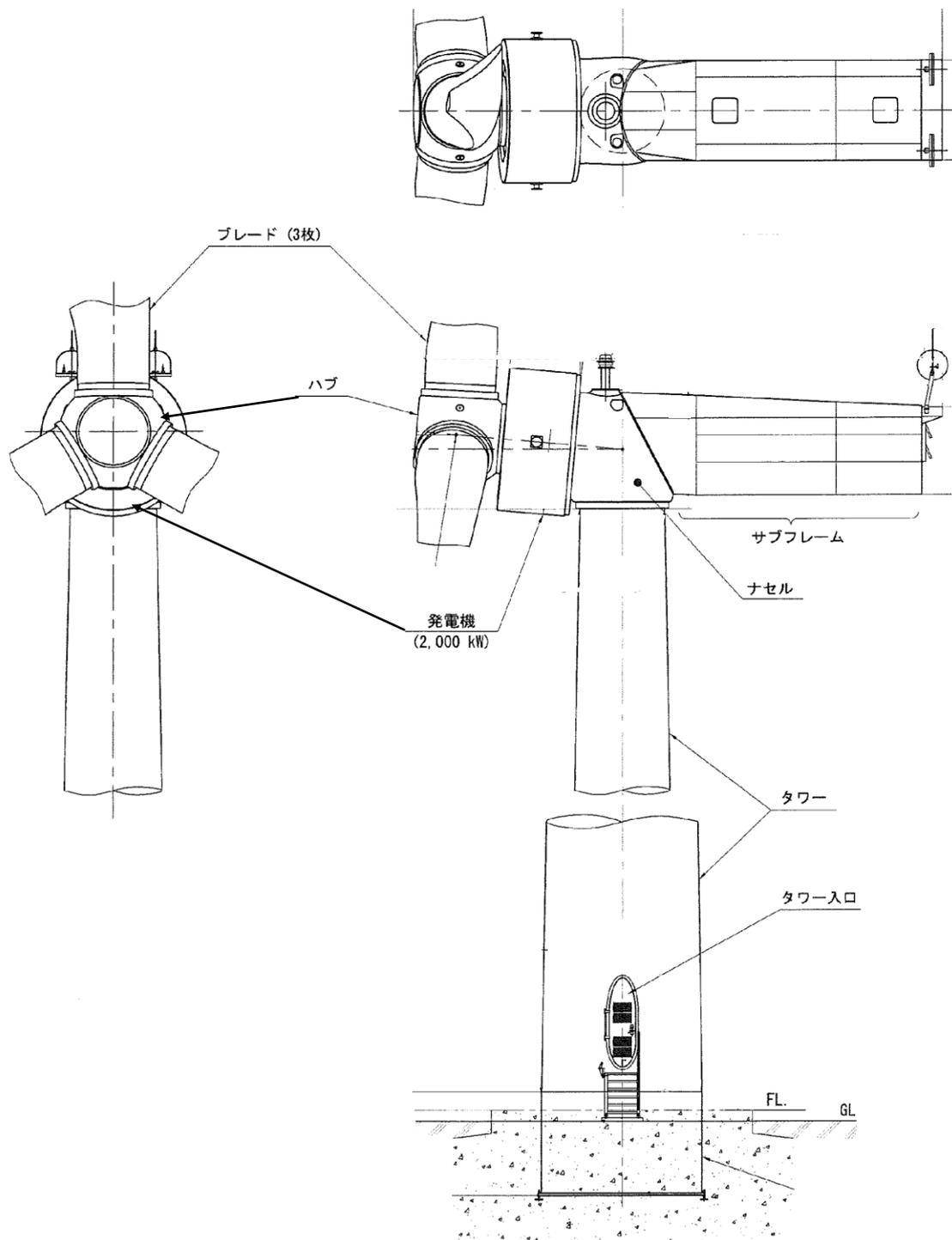


図 2-3 風力発電設備の各部位名称

風車停止時においてピッチ角は90deg付近にありロータを回転させない角度となる。この状態をフェザリングと呼ぶ。風車が起動状態に入るとピッチ角はフェザリングから0deg付近へ移行する。

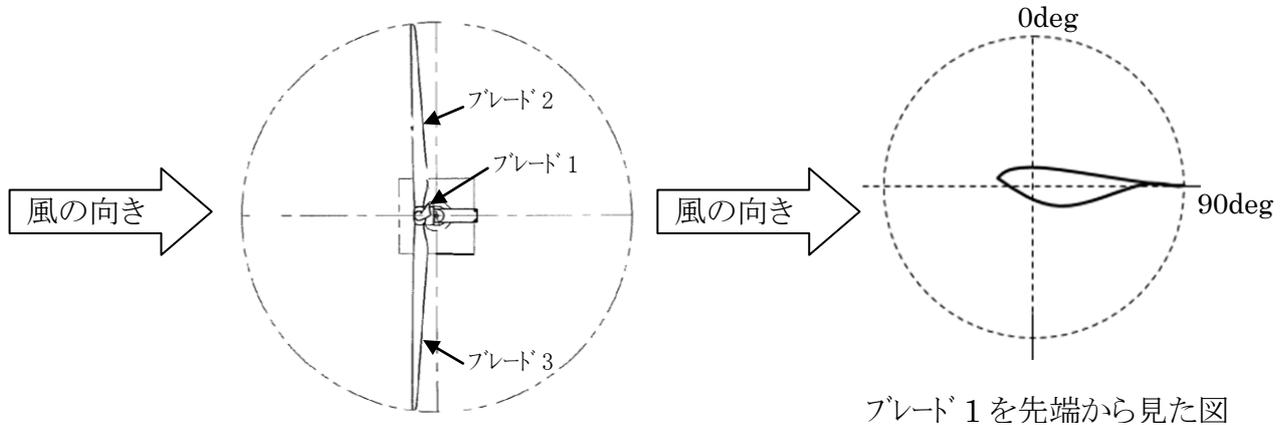
この状態から風速に応じてピッチドライブによるピッチ制御が行われる。低風速では0degに近い角度、高風速になるに従い角度がつけられ最適な出力制御を図るべくピッチ制御が行われる。停電時にはハブ内に設置されたバッテリーより電源を供給する。

また、3秒平均の風速が30m/sあるいは10分間平均が25m/sを超えるとピッチ角をフェザリング状態とし、風車を停止する。

さらに、3秒平均の風速が40m/s(或いは10分間平均が35m/s)を超えるとフェザリング状態で、ロータを風下へ向けるストームモードとなる。

① フェザリング状態・・・ロータを風上に正対させ、ピッチ角は90deg付近にある状態。

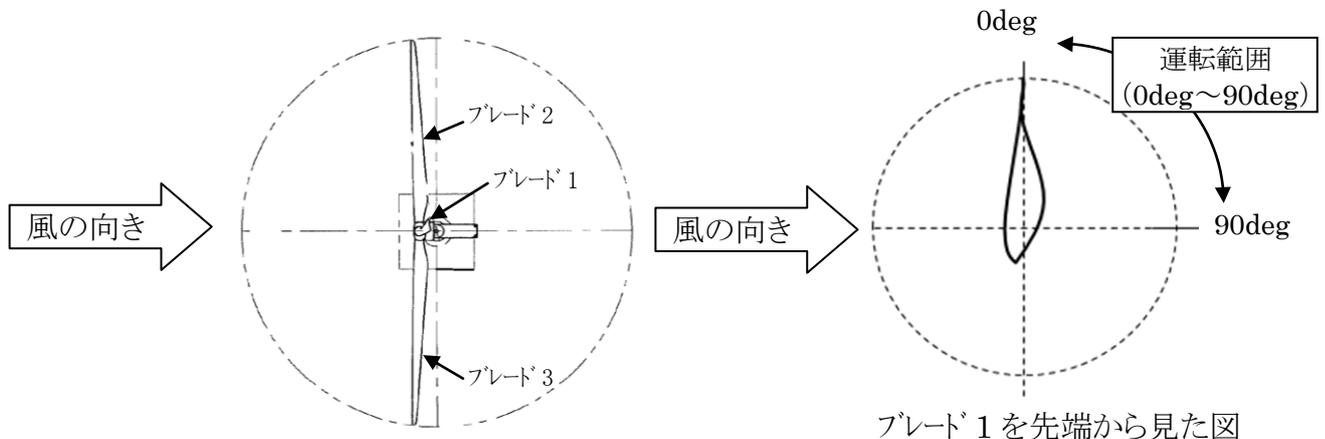
ロータの回転は停止している状態。



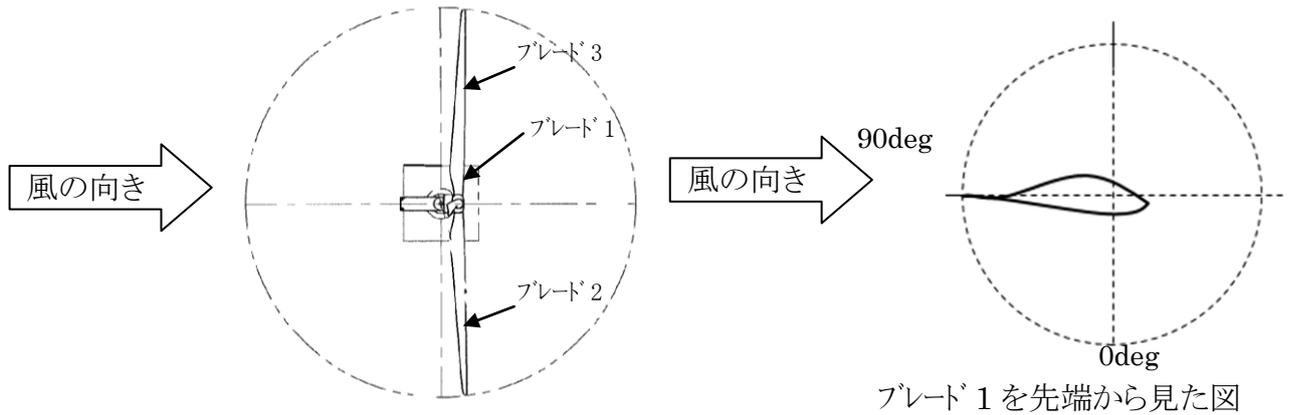
② ファイン状態・・・ロータを風上に正対させ、ピッチ角は0deg付近にある状態。

ロータは回転している状態。

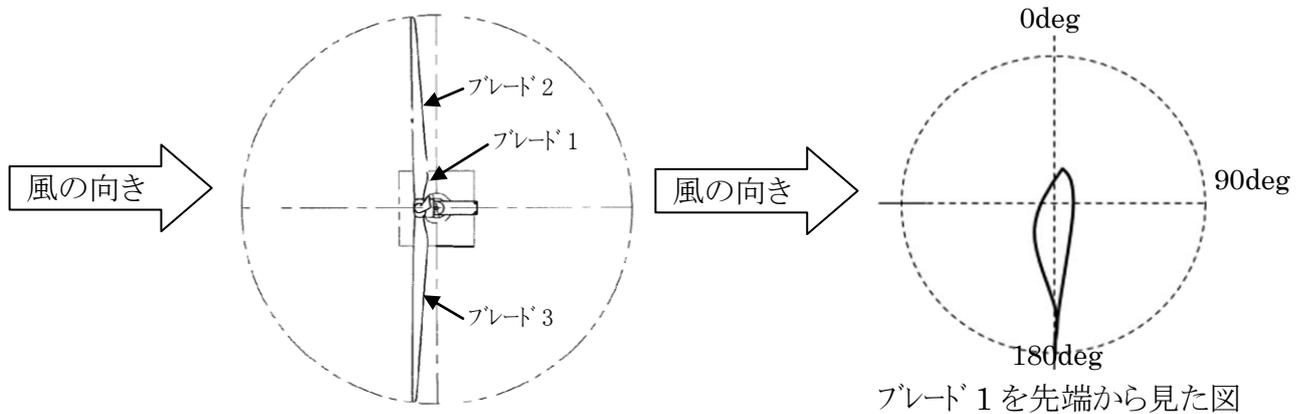
運転時は風速に応じ、ピッチ角が0deg～90degの範囲で変動している。



- ③ ストームモード・・・ロータを風下側に向け、ピッチ角はフェザリング(90deg 付近)にある状態。ロータの回転は停止している状態。



- ④ 逆フィン状態・・・ロータの向きにかかわらず、ピッチ角がフィン(0deg)と逆の 180deg 付近にある状態。通常は発生しないピッチ角度。



- ⑤ 逆フェザー状態・・・ロータの向きにかかわらず、ピッチ角がフェザリング(90deg)と逆の 270deg(-90deg)付近にある状態。通常は発生しないピッチ角度。

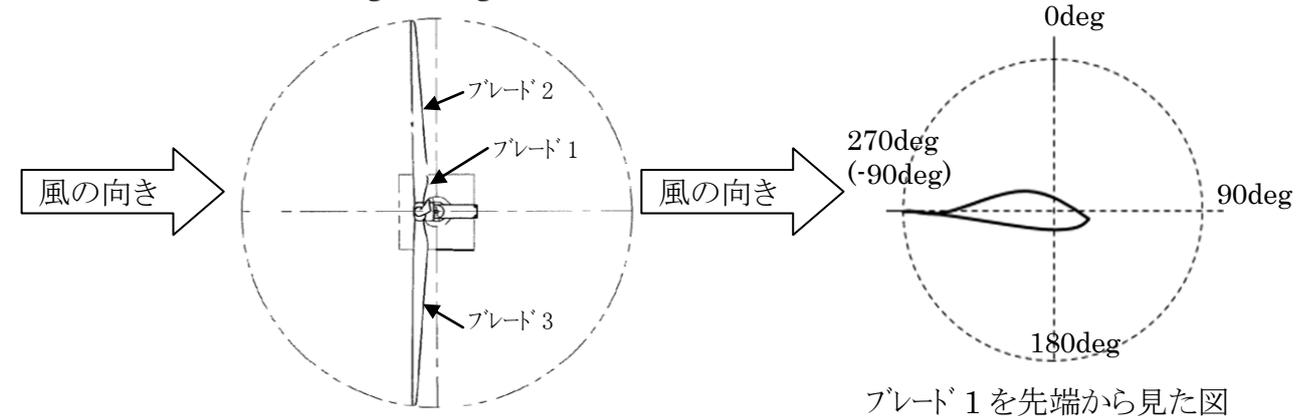


図 2-4 ブレード・ナセル状態説明図

※注釈:本報告書ではピッチ角の表記に、360deg 表記と、0deg を中心としてプラス・マイナスで表記する方法を用いている。0deg を中心とした表記では、180deg=-180deg となり、185deg は -175deg と同じ角度を示す。

(2) 事故の概要

平成 25 年 4 月 7 日 16 時 37 分～55 分の間で、CK-19 のナセルが脱落したと推定される。(16 時 37 分に発生した変圧器地絡故障により、所内供給電力が遮断され、以降の運転記録が途絶えてしまったことおよびその後に匿名者からブレードがなくなったとの通報があったことから推定)

ナセル脱落の状況を図 2-5 に、タワー損傷状況を図 2-6 に、ナセル損傷状況を図 2-7 に示す。

また、5 月中旬に実施したタワーのレーザ計測によるタワー損傷位置、および 5 月下旬に実施した撤去作業に合わせ撮影したタワー損傷状況詳細を図 2-8～図 2-10 に示す。



【ナセル落下状況】



【タワー損壊状況】



【全体写真】

図 2-5 ナセル脱落状況



【タワー頂部損壊状況1】



【タワー頂部損壊状況2】



【タワー中間部～基礎部・ブレード損壊状況】



【タワー中間部損傷部】

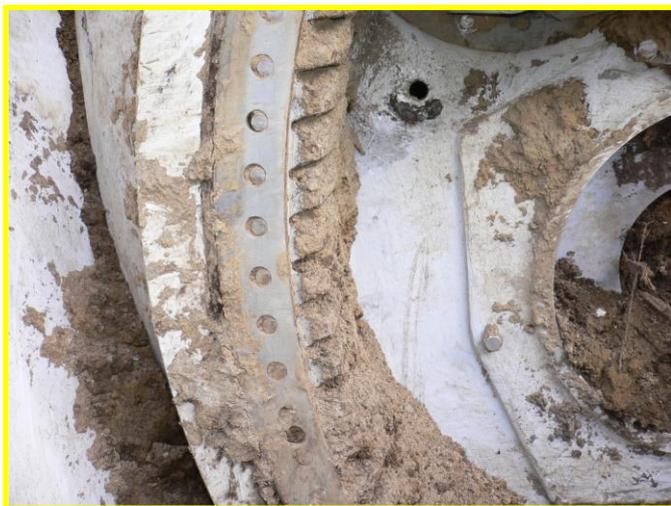
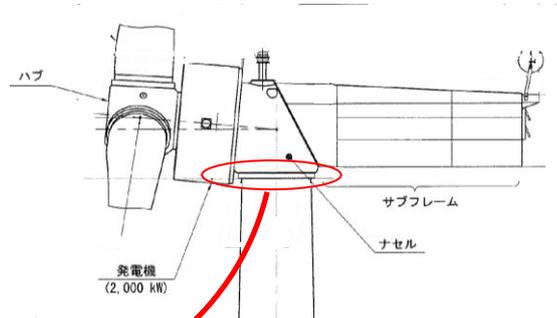
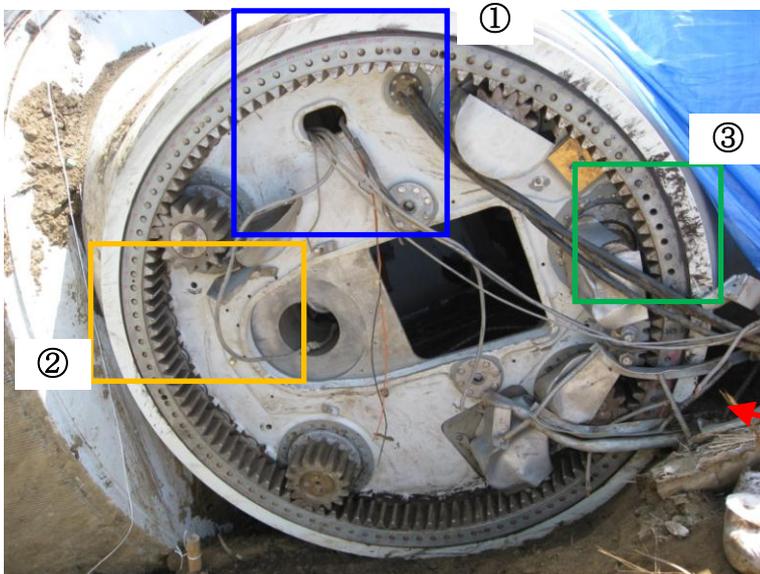
【タワー最下部・ブレード損壊状況】



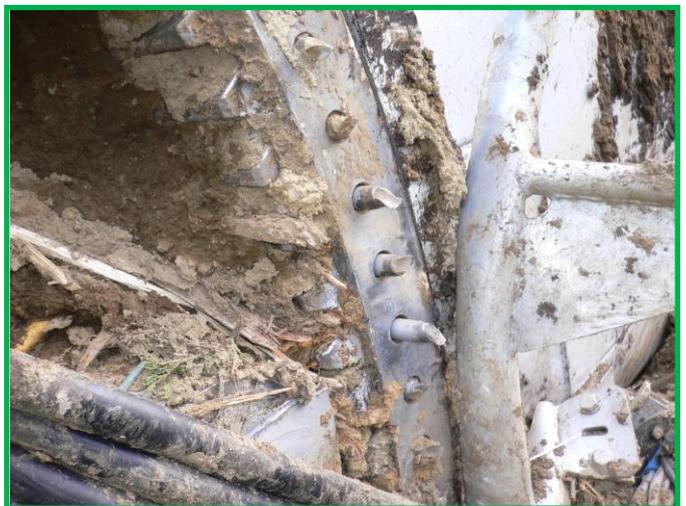
図 2-6 タワー損傷状況



① ナセル破断面(ハブから見て右側)



② ナセル破断面(ハブ側)



③ ナセル破断面(変圧器側)

図 2-7 ナセル損傷状況



a : 南東



b: 南東



c: 南西

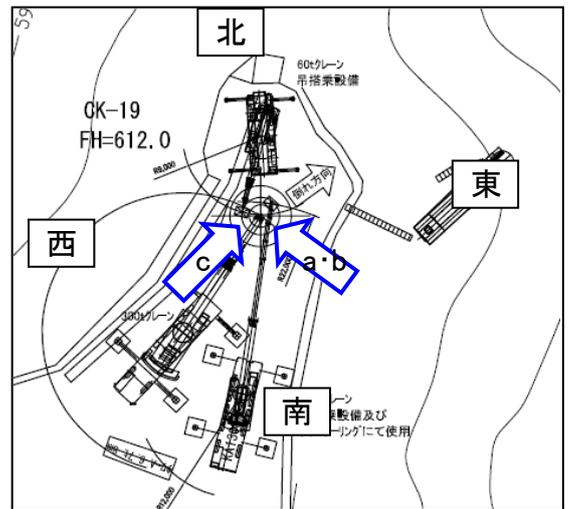
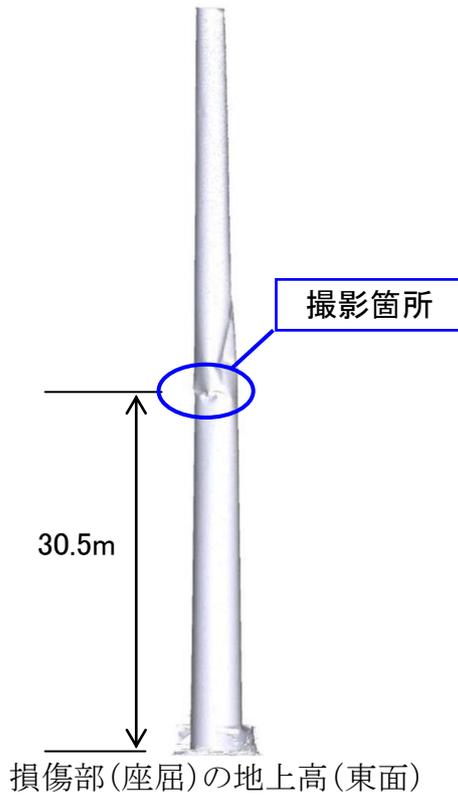


図 2-8 タワ-損傷状況詳細①



d:北北西



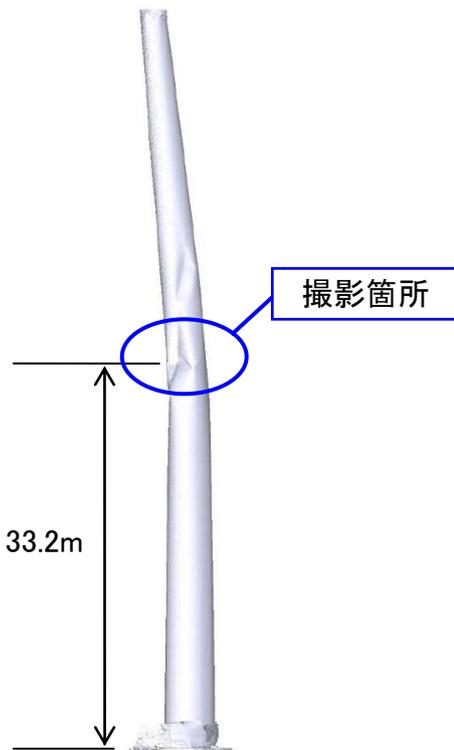
e:東側



f:北側



クラック部写真(長さ 370mm)



ブレード打痕(撮影箇所)の地上高(北面)

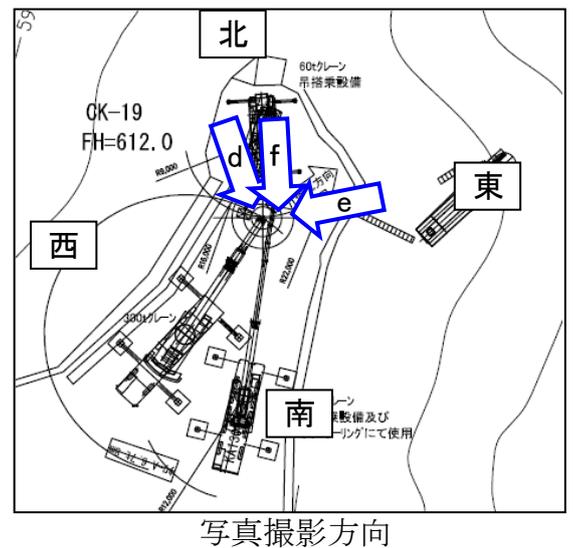


図 2-9 タワー損傷状況詳細②

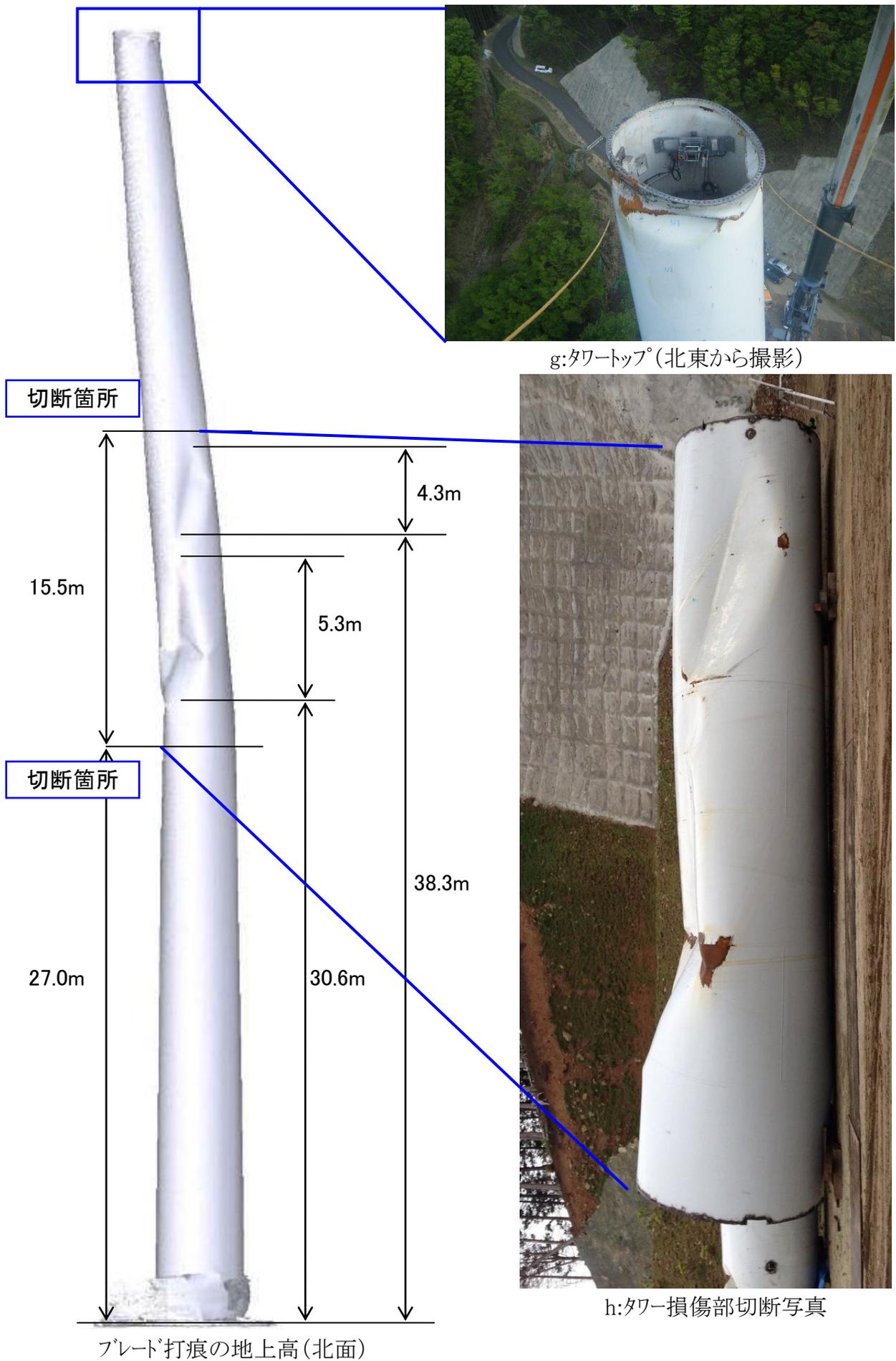


図 2-10 タワー損傷状況詳細③

3. 事故状況

(1) 事故発生時の気象状況・風況

発達した低気圧の通過に伴い、三重県北部は4月7日早朝から強い風に見舞われ、15時40分には津地方気象台において最大瞬間風速 19.2m/s(風向:西)を記録している。また、WP 笠取 CK-19 に残された運転記録からは、15時頃から平均風速が 20m/s を超え、16時27分に最大瞬間風速 42.0m/s(風向:西北西)を確認した。

4月7日15時および18時の天気図を図3-1に、4月7日12時00分～16時37分にCK-19に設置した風向風速計で観測された運転記録を図3-2に示す。

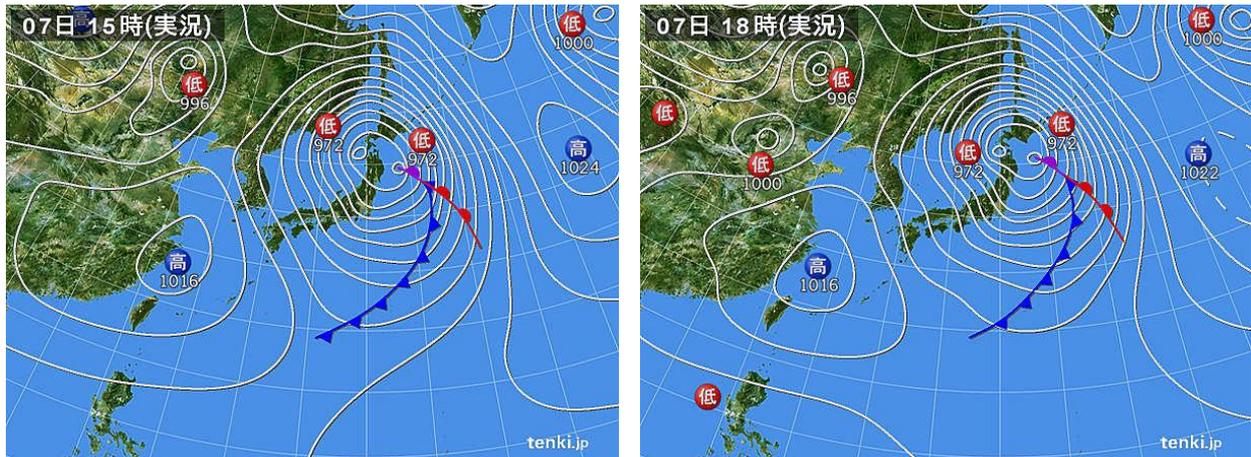


図3-1 4月7日15時および18時の天気図

(2) 事故発生時の風車状況

4月7日12時00分から16時37分におけるCK-19の運転記録(風向・風速・ナセル方向・ブレードピッチ角・ロータ回転数・ヨーブレーキ圧)とアラーム・イベントログの発生状況を図3-2に示す。表3-1に主なアラーム・イベントログを示す。

表3-1 主なアラーム・イベントログ(1/2)

イベント		アラーム		説明
時刻	ログ	時刻	ログ	
		12:28	コンバータトリップ	運転停止
14:52	カットアウト動作			(瞬間風速 30m/s 超過)
15:01	カットアウト復帰			(瞬間風速 20m/s 以下)
15:15	カットアウト動作			(瞬間風速 30m/s 超過)
15:56	ストームモード移行開始			(瞬間風速 40m/s 超過)
		16:01	ピッチ 1 インバータ異常発生	ブレード 1 がフェザリングからファイン方向に変位しはじめる
16:02	ストームモード移行完了			
		16:06	ピッチ 3 インバータ異常発生	ブレード 3 がフェザリングからファインと逆方向に変位しはじめる
		16:07	ピッチ 2 インバータ異常発生	ブレード 2 がフェザリングからファインと逆方向に変位しはじめる

表 3-1 主なアラーム・イベントログ(2/2)

イベント		アラーム		説明
時刻	ログ	時刻	ログ	
		16:36:25	発電機およびロータ過回転	設定値 24rpm(ソフト), 26rpm(ハード)で動作
16:36:28	手動ヨーモード動作※1	16:36:28	セーフティチェーン動作(注)	※1 セーフティチェーン動作に伴い出力
16:36:29	ヨー旋回指令(時計方向)			セーフティチェーン動作に伴い指令出力
		16:36:34	ヨー旋回方向異常	
		16:36:38	ナセル異常振動	
		16:37	変圧器地絡故障他多数動作	

(注)セーフティチェーン(安全連鎖)

セーフティチェーンは、PLC 制御より優先度が高いハード回路による安全装置である。セーフティチェーンは以下の条件で動作する。

- ・ロータの過回転:26.0rpm(定格速度(19rpm)の 1.37 倍)
- ・振動(スプリングレバースイッチ)
- ・制御盤で手動非常停止スイッチを押した場合
- ・PLC※(WP4X00)の異常
- ・ピッチドライバのハード異常

セーフティチェーン動作後は、系統またはバッテリーによるブレードのピッチ制御により、フェザリング状態に戻す。3枚のブレードのピッチ制御は各々独立の安全システムとして設計されている。この機能により、2枚のブレードピッチ制御が故障した場合でもフェザリングすることで、ロータを最大回転速度から停止状態にすることができる。

※PLC:風車の主制御装置を示す。

a. ナセルの動き

図 3-2 に風向(瞬時値), ナセル方向(瞬時値)および風向とナセル方向の偏差(瞬時値)を示す。12:00 頃の風向は西北西の風で、事故発生までほぼ一定であった。ナセルは風向変化に追従して旋回していたが、15:40 頃から風向とナセル方向偏差が徐々に大きくなった。『ストームモード』が始まった 15:56:47 の偏差は 57.6deg となり、西北西の風に対しナセルは西南西方向を向く状態となった。

しかし、『ストームモード』移行が完了した以降は、風向とナセル方向偏差はほぼ 180deg を維持(西北西の風向に対し、ナセル方向は東南東)していた。16:36:28 の『セーフティチェーン動作』後に『ヨー旋回指令(時計方向)』が出されたが、指令とは反対の反時計回り(東南東～東～北～西に旋回)に旋回した。これにより、16:36:34 に『ヨー旋回方向異常』が動作したがナセルは旋回し、風向 256deg(1秒値), ナセル方向 299deg(1秒値), 偏差 -32deg(風向およびナセル方向の 3秒平均値の差)が最後の記録として残されている。

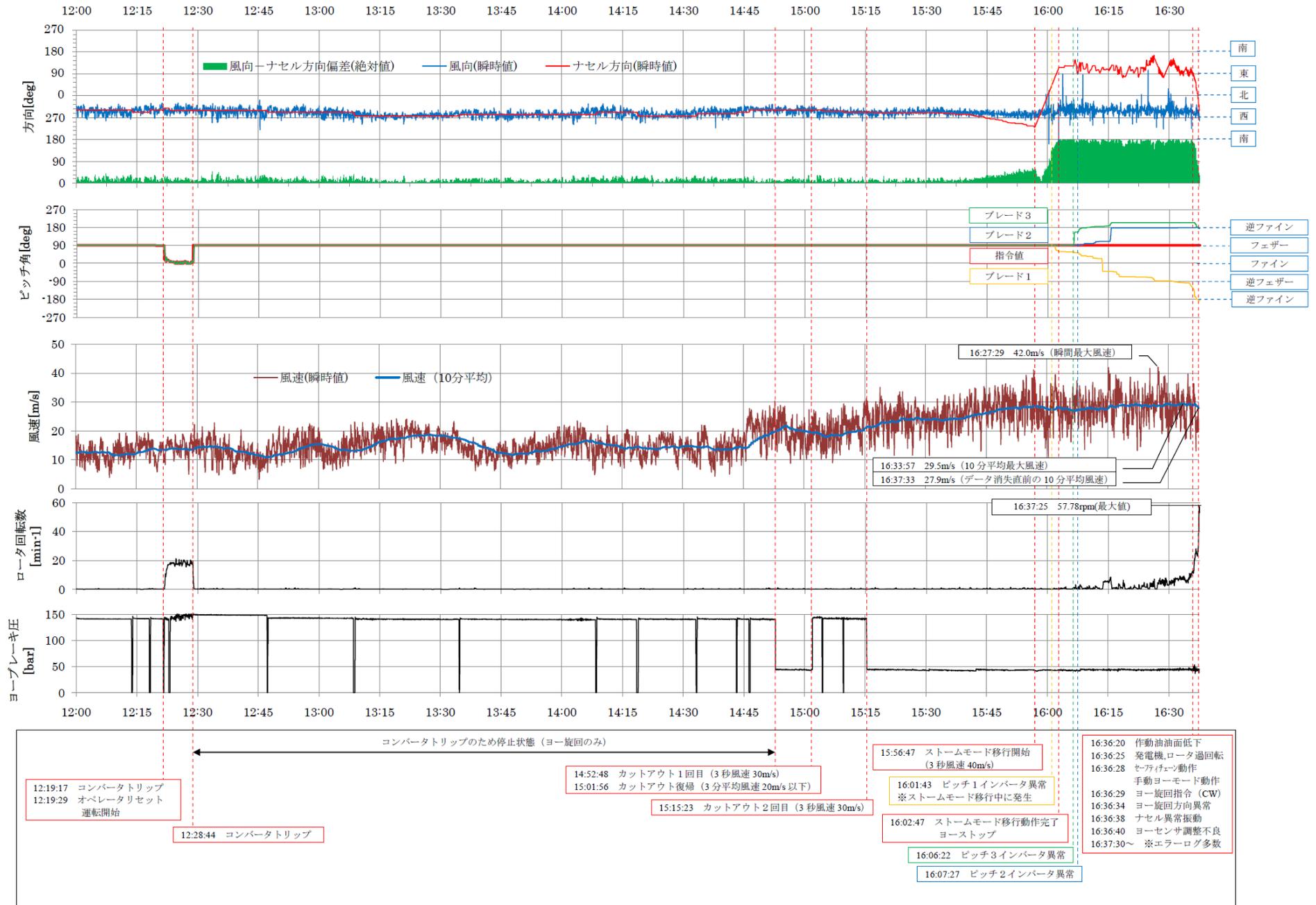


図 3-2 CK-19 運転記録およびアラーム・イベントログ (4月7日 12時00分から 16時37分)

b. ピッチ制御

『ストームモード』移行中の 16:01:43 に発生した『ピッチ 1 インバータ異常』までは各ブレードともフェザリング(ピッチ角 90deg)を維持し、正常な状態であった。『ピッチ 1 インバータ異常』発生後、ブレード 1 はファイン方向(ピッチ角 90deg から 0deg 方向)に不規則な速度(ピッチ制御速度 6deg/s に対し最大 15.11deg/s)で変位を始め、最終的には-187deg(ファインと逆方向)まで変位している。『ストームモード』移行完了後、16:06:22 に『ピッチ 3 インバータ異常』、16:07:27 に『ピッチ 2 インバータ異常』が発生した。ブレード 3 およびブレード 2 は逆ファイン方向(ピッチ角 90deg から 180deg 方向)に不規則な速度(ピッチ制御速度 6deg/s に対し最大 18.82deg/s(ブレード 2)、12.96deg/s(ブレード 3))で変位を始め、最終的にはブレード 3 は 176deg、ブレード 2 は 175deg まで変位している。3 枚のブレードはフェザリング状態が維持できなくなっていた。『ピッチ 2 インバータ異常』発生以降はロータの回転が不規則に発生し、16:35 頃から急激に回転数が上昇した。16:36:25 には発電機・ロータ回転数が 24rpm を超過、16:36:27 には 26rpm を超過した。16:37:25 には最大 57.78rpm の記録が残されている。

ピッチドライバは 12:28 に発生したコンバータトリップを受けて、全てのブレードをフェザリング状態に変位させ、フェザリング完了後はピッチモータに「モータブレーキ on」信号を出力し、制御を停止していた。ピッチドライバが「モータブレーキ on」状態であるにもかかわらず、「モータエンコーダ値」および「ピッチトランスデューサ値」が変化することで「ピッチインバータ異常」が全軸で動作した。このピッチドライバのエラー検出時刻を表 3-2 に示す。

また、ピッチモータを動かす前に出力される「モータブレーキ off(解除)」信号は 12:21 以降出ないことから、ピッチモータは駆動していないと推定される。

表 3-2 ピッチドライバが各ブレードの値(位置)の変化を検出した時刻

番号	ピッチドライバが値の変化を検出した時刻	
	モータエンコーダ値	ピッチトランスデューサ値
ブレード 1	16:01:43	16:01:43
ブレード 2	16:07:27	16:07:27
ブレード 3	16:06:22	16:06:22

※本報告書ではピッチ角の表記に、360deg 表記と、0deg を中心としてプラス・マイナスで表記する方法を用いている。0deg を中心とした表記では、-180deg=180deg となり、-175deg は 185deg と同じ角度を示す。

c. ロータ回転数

12:28 に発生した『コンバータリップ』により、風車は停止しロータ回転数はほぼ 0rpm であった。16:01:43 にブレード 1 のピッチ角が、16:06:22 にブレード 3 のピッチ角が、16:07:27 にブレード 2 のピッチ角がそれぞれ変位し始めたことにより、ロータは不規則に回転するようになった。ピッチ角とロータ回転数の動きを表 3-3 に示す。

また、ピッチ角が通常の運転範囲である 0deg～90deg を超えて変位し、各ブレードともピッチ角が逆フィン状態(180deg 付近)となったことで、ロータは通常の回転方向(ハブから見て時計方向)とは逆方向に回転したと推定される。(ロータ回転方向は記録されない。)

表 3-3 ピッチ角とロータ回転数の動き

時刻	ピッチ角(deg)			ロータ回転数 (rpm)	備考
	ブレード 1	ブレード 2	ブレード 3		
16:01:43	87.0	90.0	90.1	0.31	ブレード 1 ピッチインバータ異常
16:06:22	58.1	91.5	92.8	1.22	ブレード 3 ピッチインバータ異常
16:07:27	53.8	92.5	158	0.4	ブレード 2 ピッチインバータ異常
16:14:09	-39.8 (320.2)	111	187	6.02	ブレーキ時間超過
16:36:13	-155 (205)	179	204	19.27	ロータ回転数が定格 回転数を超過
16:36:26	-168 (192)	179	198	24.49	ロータ過回転動作
16:36:28	-169 (191)	179	198	24.75	セーフティチェーン動作
16:36:34	-170 (190)	179	197	27.96	ヨー旋回方向異常
16:36:38	-171 (189)	182	194	26.38	ナセル振動異常
16:37:14	-185 (175)	178	179	31.23	ロータ回転数が 30rpm を超過
16:37:18	-187 (173)	175	176	41.49	ロータ回転数が 40rpm を超過
16:37:22	-187 (173)	174	175	51.4	ロータ回転数が 50rpm を超過
16:37:25	-187 (173)	174	175	57.78	ロータ回転数が最大 となる
16:37:32	-187 (173)	175	176	53.19	最後の記録

(3) 事故状況

ブレードその他落下物の飛散状況を図 3-3 に示す。また風車周辺の名セル、ブレードの飛散状況を図 3-4 に、タワー屈曲状況を図 3-6 に示す。また、主な部品の落下方向、落下距離が確認できたものを表 3-4 に示す。

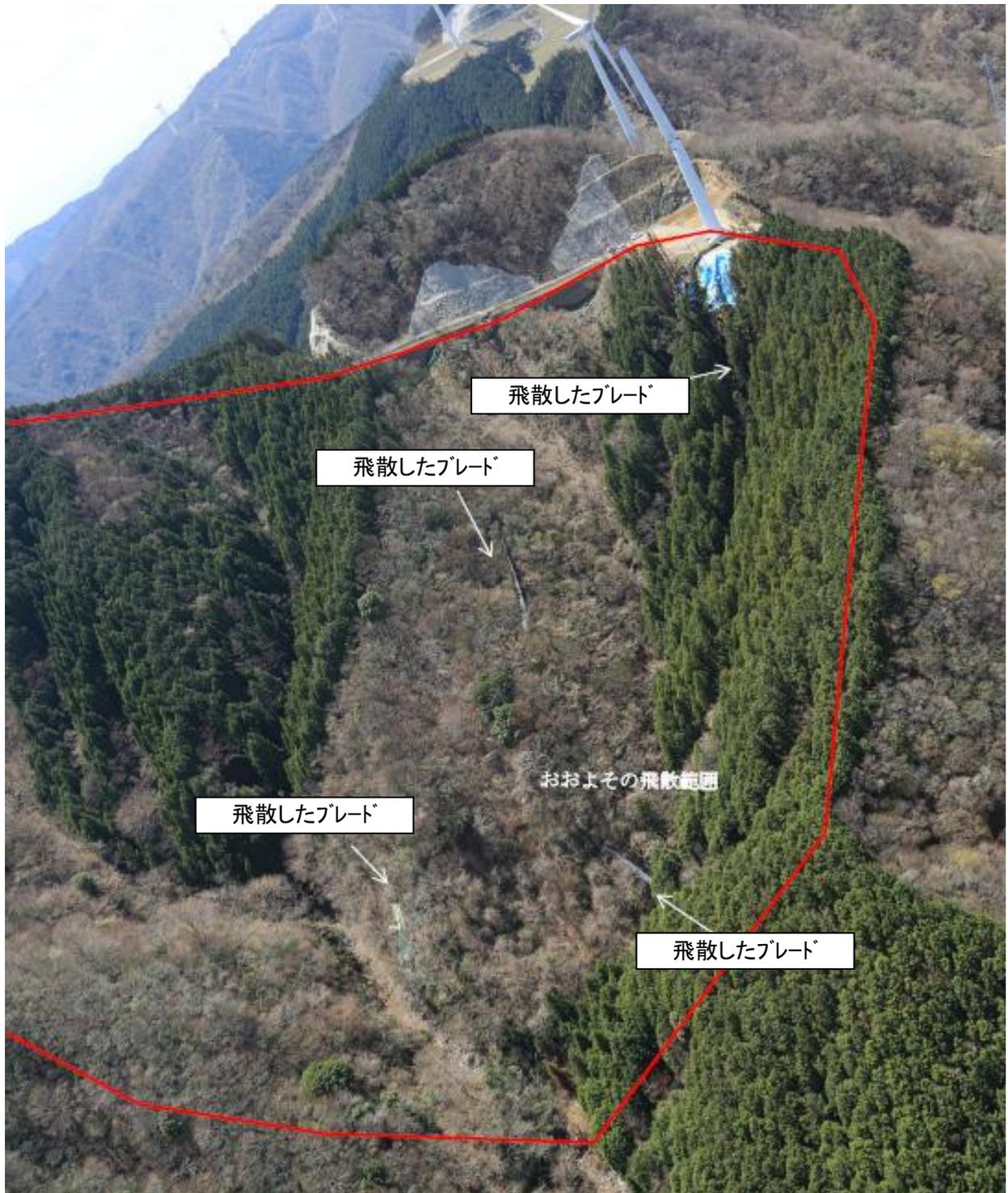


図 3-3 落下物の飛散状況

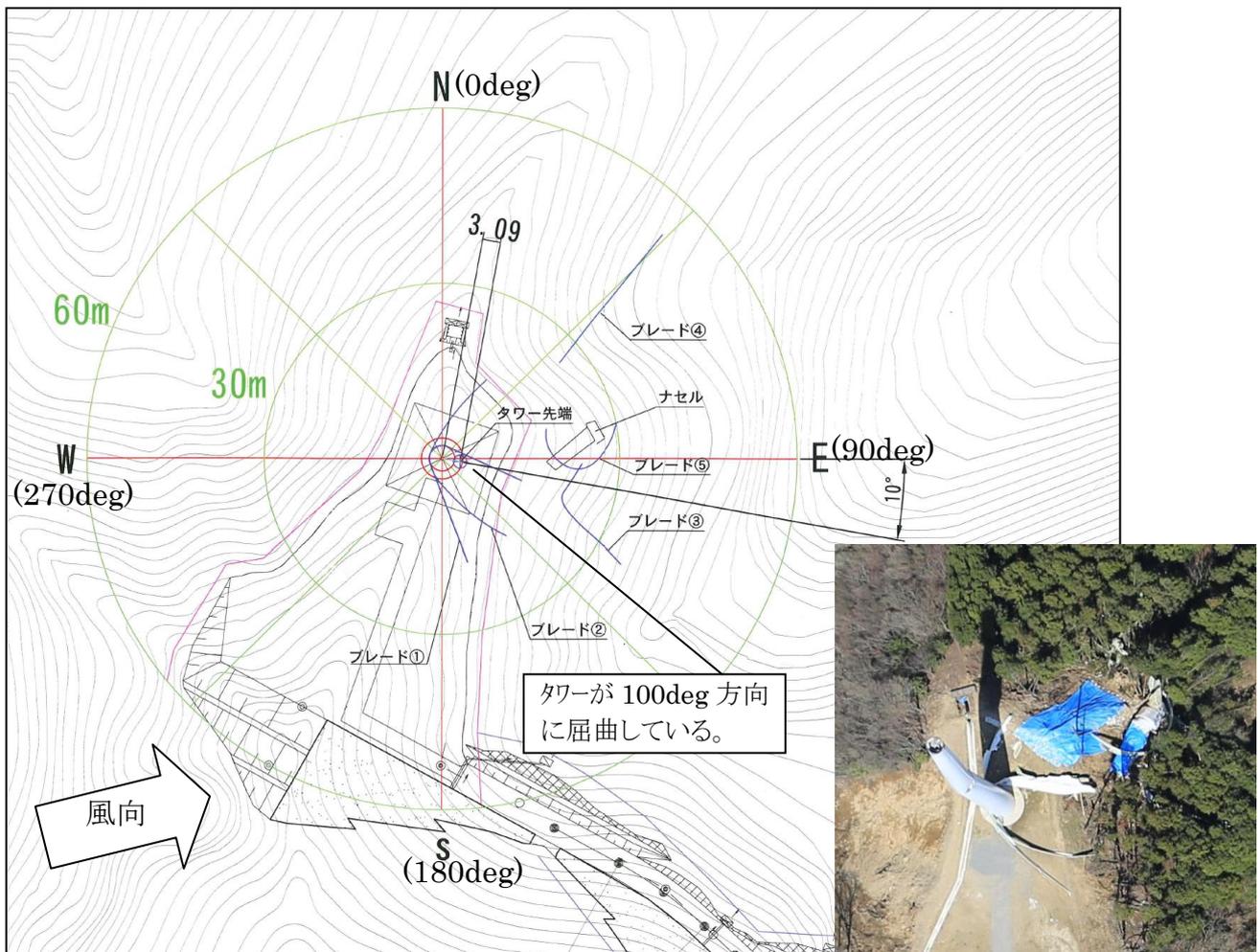


図 3-4 風車周辺のナセル・ブレード飛散状況

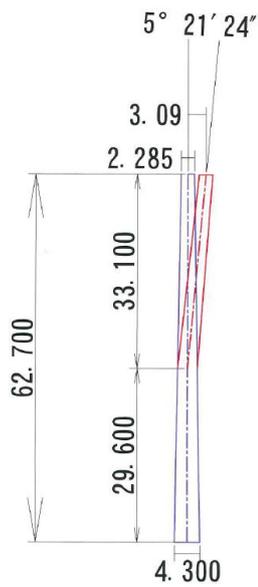


図 3-5 タワー屈曲状況

表 3-4 落下方向と落下距離

部品	落下方向	落下距離
発電機, ナセル	80deg~90deg	16~28m
ブレード①, ②	タワーに巻き付いた状態	0~15m
ブレード③	90deg~115deg	16~33m
ブレード④	45deg	28~60m
ブレード⑤	80deg~90deg	16~30m

最後に記録されている風向 256deg(西南西)に対し、部品の落下方向は 45deg～115deg であったことから、ほぼ風下側に落下したものと推定される。ブレードは表裏が剥離し、プレッシャーサイドとサクシオンサイドがそれぞれ分離・飛散していた。ナセル・ハブ・発電機は一体のまま落下し、ハブから見て左側面を下に着地していたが、タワーとの接合部に土が付着していたことから、一旦接合部を下に着地した後、横転したものと想定される。

ナセルとタワー間の接続ボルトは破断しており、ハブ側寄りのボルト(M24 71/108 本)破断面はせん断応力による切断の様相を示しており、反対側の変圧器側寄りボルト(M24 37/108 本)は引っ張り応力による切断の様相を示していることを確認している。なお、ナセル・ハブ内部の状況については確認できていない。

タワーは頂部が西北西に座屈しているとともに、ねじれが生じている。頂部から約 33m下の部分を起点に東南東(100deg)に約 5deg 屈曲している。

基礎については、風下方向に若干の化粧コンクリート剥離を確認した。

4. 設備メンテナンス状況の確認

至近に行った点検実績を表 4-1 に示す。点検結果はいずれも良好であり、異常は認められなかった。

表 4-1 至近の点検実績一覧

点検種別	点検頻度	至近点検日
月次点検	1回/月	平成 25 年 3 月 11 日
定期点検	1回/6ヶ月	平成 24 年 10 月 26 日～29 日
緊急点検	必要の都度	平成 25 年 3 月 15 日 (京都府太鼓山事故を受けて)

※ピッチモータブレーキは 1 回/3 年の頻度で内部摩耗粉の清掃およびブレーキギャップの測定を行うこととなっている。

CK-19 号機は運転開始から 3 年未満であり、ピッチモータブレーキ点検の実績はない。

5. 事故原因の究明

(1) 事実の確認

- ① 低気圧の通過に伴う強風により、風車はフェザリング状態で正常にストームモードに移行した。その際、3枚のブレードピッチ角が変化し、フェザリング状態が維持できなくなった。このとき、ピッチ角の異常を意味する「ピッチインバート異常」警報が動作したが、フェザリング状態へ移行するようなピッチ制御は行われなかった。
- ② ブレードはフェザリング状態が維持出来ず、3枚別々に逆ファイン状態へ移行した(制御信号無)。これにより、ロータは通常運転とは逆方向に回転し過回転となり、セーフティチェーン(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、ヨ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、ロータ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 事故後の調査から、ナセルの接合は1/3が引張応力、2/3がせん断応力により破壊しており、これによりナセルが脱落したものと推定される。

(2) 方針

今回の事故原因について、大きく分けて下記の3点について原因究明を行う。

- ① 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ため、事故機からピッチモータを回収しピッチコントロールシステムの不具合有無について原因究明を行う。
- ② 3月に発生した他サイトのナセル脱落事故の事故原因と共通性がないか確認するため、ナセル・タワートップ結合ボルトの破断面を観察し、破断原因を考察する。
- ③ 運転ログデータをもとに、事故直前の風車挙動を模擬した風応答解析を行い、ブレードに作用した荷重や過回転時のブレード変位量を考察する。

(3) CK-19号機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。

a. CK-19号機ピッチモータの分解調査結果

落下したCK-19号機のナセル内を調査した結果、目視で確認できる範囲では、ピッチベアリング、レデュサピニオン、レデュサ本体には大きな損傷は見られなかった。

CK-19号機から回収した3台のピッチモータの分解調査結果概要を表5-1に示す。

1軸のピッチモータは落下の衝撃でハブから脱落したために損傷が激しく、モータシャフトが曲がった状態であった。他の2軸はハブに固定された状態で発見され、外観には大きな損傷は見られなかった。モータの機能は、1軸はシャフトの曲がりのため確認ができなかったが、他の2軸はモータが可動できることを確認した。

分解調査の結果、3軸ともスプラインは著しく摩耗し、またギャップは規定の $0.25\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$ を大幅に上回っていた。更にブレーキ保持トルクは $20\text{Nm}\sim 35\text{Nm}$ であり、規定値である 200Nm ※を下回っていた。スプライン(メス側)の材質は成分分析により、3軸ともアルミ合金製であることを確認した(スプライン(オス側)の材質は鋼製)。

※ 200Nm は購入仕様値であり、設計上必要な値は約 100Nm

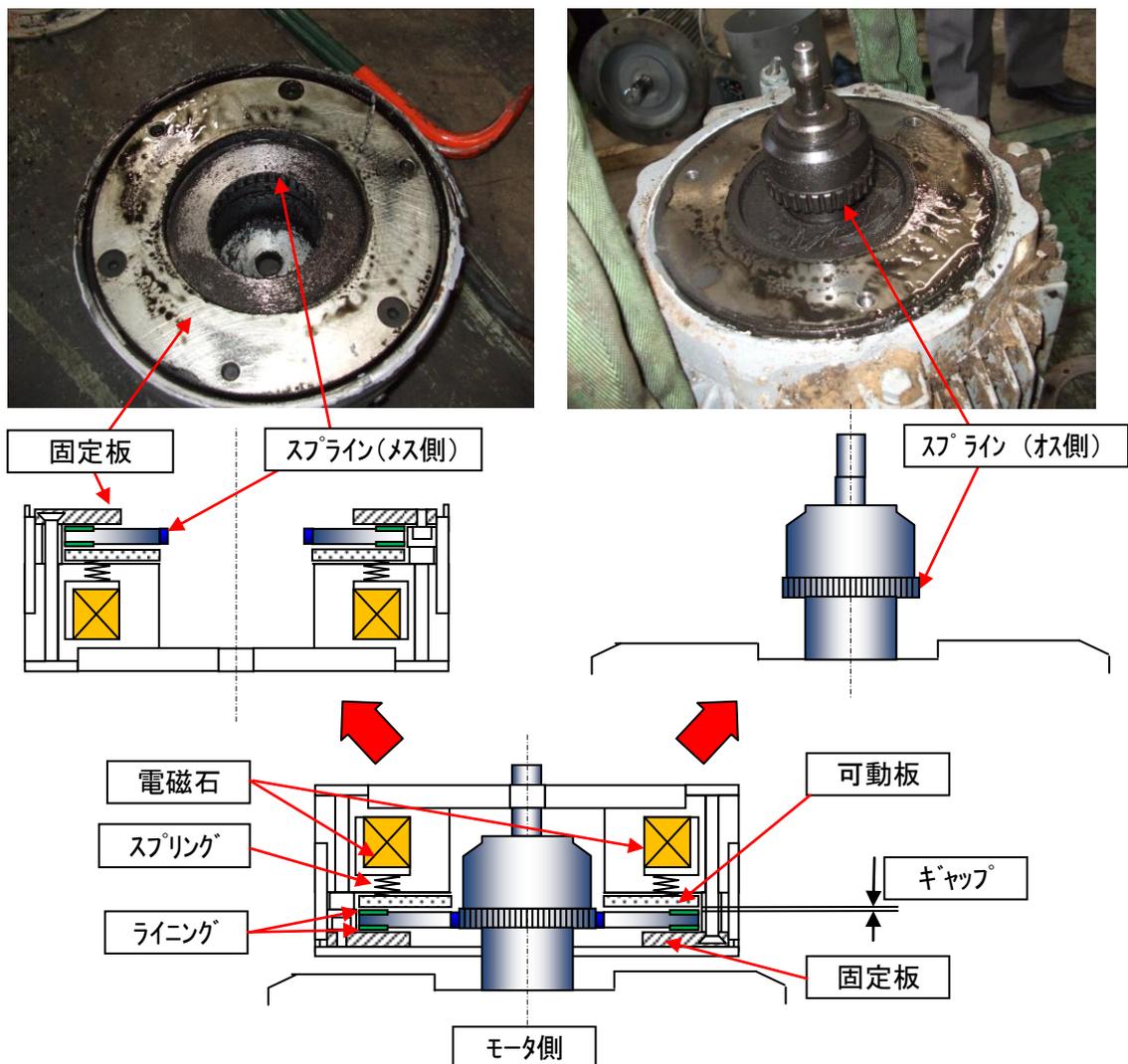
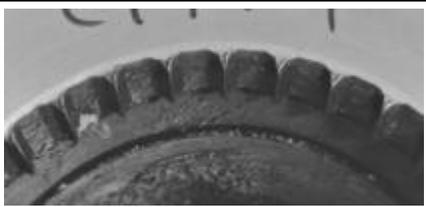


図 5-1 ピッチモータブレーキの構造

表 5-1 CK-19 号機から回収されたピッチモータ及びブレーキの調査結果概要

		1 軸	2 軸	3 軸	仕様・規定値
外観					
		モータシャフトが大きく曲がり、レギュレーサフランジのネック部残留。ファンカバーも大きく変形。	一部のフィンが変形している他は大きな損傷なし。	ファンカバーの若干の凹みの他は損傷なし。	
モータ機能		シャフト変形のため、モータ駆動試験は実施せず。	正回転(負荷側から見て左回転)、逆回転(同右回転)とも定格回転数 1,800rpm で駆動可能。	正、逆回転とも定格回転数 1,800 rpm で駆動可能であったが、カタカタ音あり。	
ブレーキ	保持トルク	正回転: 24Nm 逆回転: 25.5Nm ※モータシャフト屈曲状態でのトルク計測のため、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
	ブレーキギャップ	2.4mm	2.2mm	2.0mm	規定値 0.15~0.35mm
	スプライン(メス側)	 三角形状に歯が摩耗 材質:アルミ合金 歯山高さ:2.23mm	 三角形状に歯が摩耗 材質:アルミ合金 歯山高さ:2.29mm	 三角形状に歯が摩耗 材質:アルミ合金 歯山高さ:2.30 mm	 未使用状態のスプライン 材質:アルミ合金 設計基準値:2.0 mm



スプライン(メス側)未使用品



スプライン(メス側)CK-19 第1軸



スプライン(メス側)未使用品の歯部拡大



スプライン(メス側)CK-19 第1軸の歯部拡大

図 5-2 スプライン(メス側)の写真(未使用品との比較)

b. 回収ピッチモータブレーキの調査結果

アルミ合金製スプラインを採用するピッチモータブレーキを回収し、ギャップと保持トルクとの関係を調査した。調査の結果、ギャップが規定値 $0.25 \pm 0.1\text{mm}$ を満足していれば、保持トルクは 200Nm 以上確保できていることを確認した。

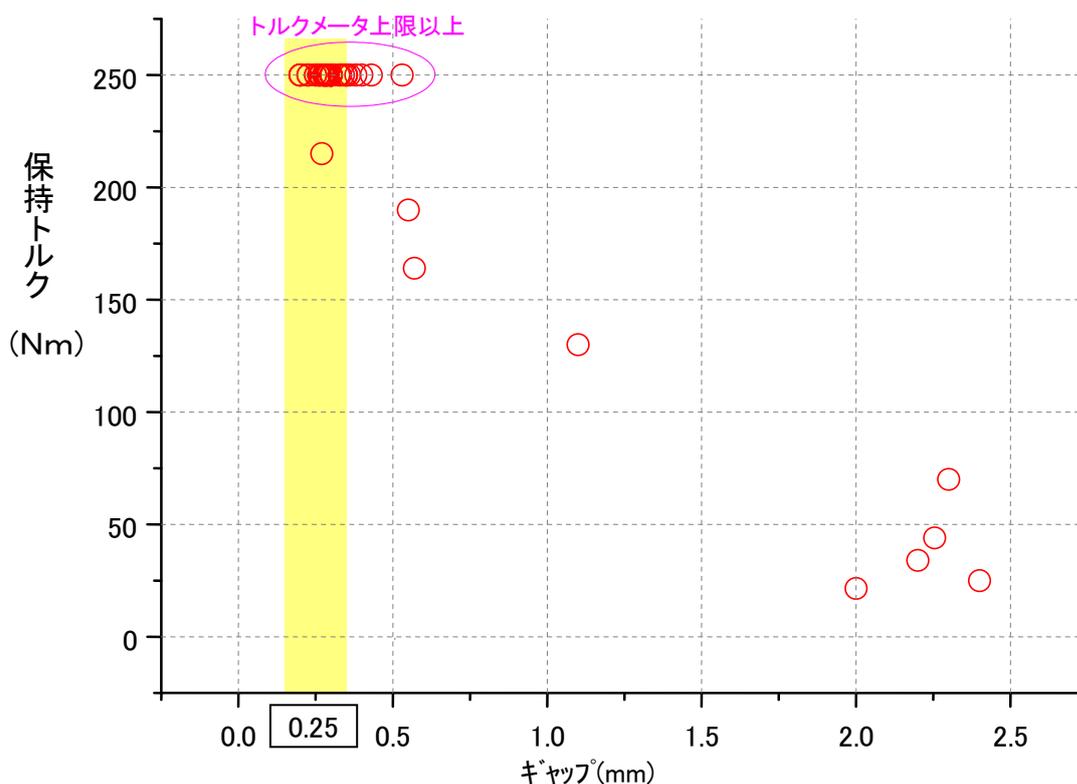


図 5-3 ギャップと保持トルクの関係

c. 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)

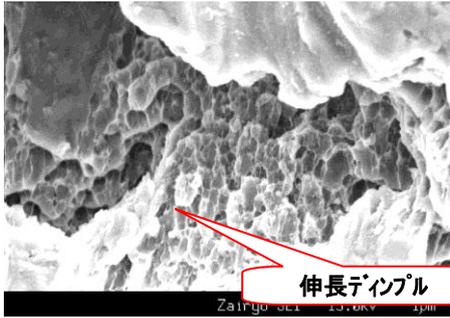
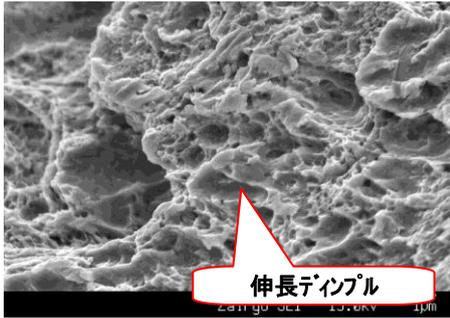
- ① スプラインのオス・メスの歯同士はわずかな隙間(約 0.05mm)を確保して組み立てられており、ブレーキが掛かっている状態において、このわずかな隙間で微振動が発生した。
- ② 微振動が繰り返されることにより、スプライン(メス側)の摩耗が進展した。
(オス側よりメス側の材質の硬度が低すぎたため)
- ③ スプラインメス側の摩耗粉がライニングに付着し、ブレーキ動作の都度、ライニングが可動板・固定板との間で摩擦することで、異常な速度でライニングが摩耗した。
- ④ ライニングの摩耗によりライニング～可動板のギャップが拡大し、スプリングのストロークが長くなったことで可動板を押しつける力が弱まり、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

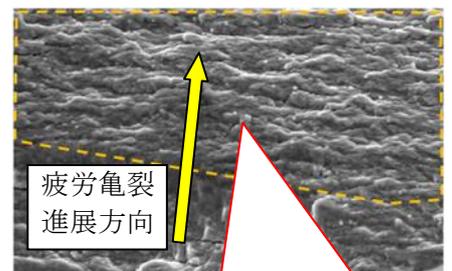
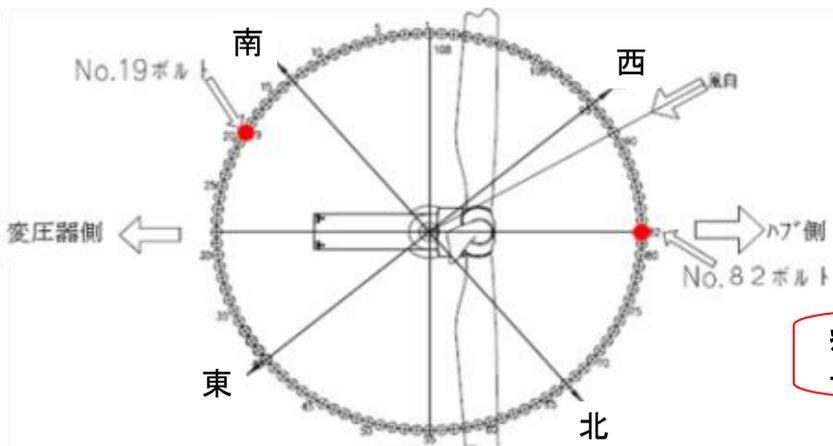
(4) ナセル・タワー結合ボルトの破損調査と事故原因への考察

ナセル・タワー結合ボルトの破損調査結果を表 5-2 に示す。破面 SEM 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（ストライエーション）は観察されなかったことからボルトの破断要因は金属疲労ではない。

※SEM：Scanning Electron Microscope（走査型電子顕微鏡）の略

表 5-2 ナセル・タワー結合ボルトの破損調査結果

調査ボルト	ハブ側ボルト（#82）	変圧器側ボルト（#19）
外 観		
破面 SEM 観察		
評価	<p>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。</p> <p>ストライエーション等の金属疲労に特有の断面は観察されなかった。</p>	<p>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。</p> <p>ストライエーション等の金属疲労に特有の断面は観察されなかった。</p>



疲労亀裂進展に直角な波状模様
→ストライエーション

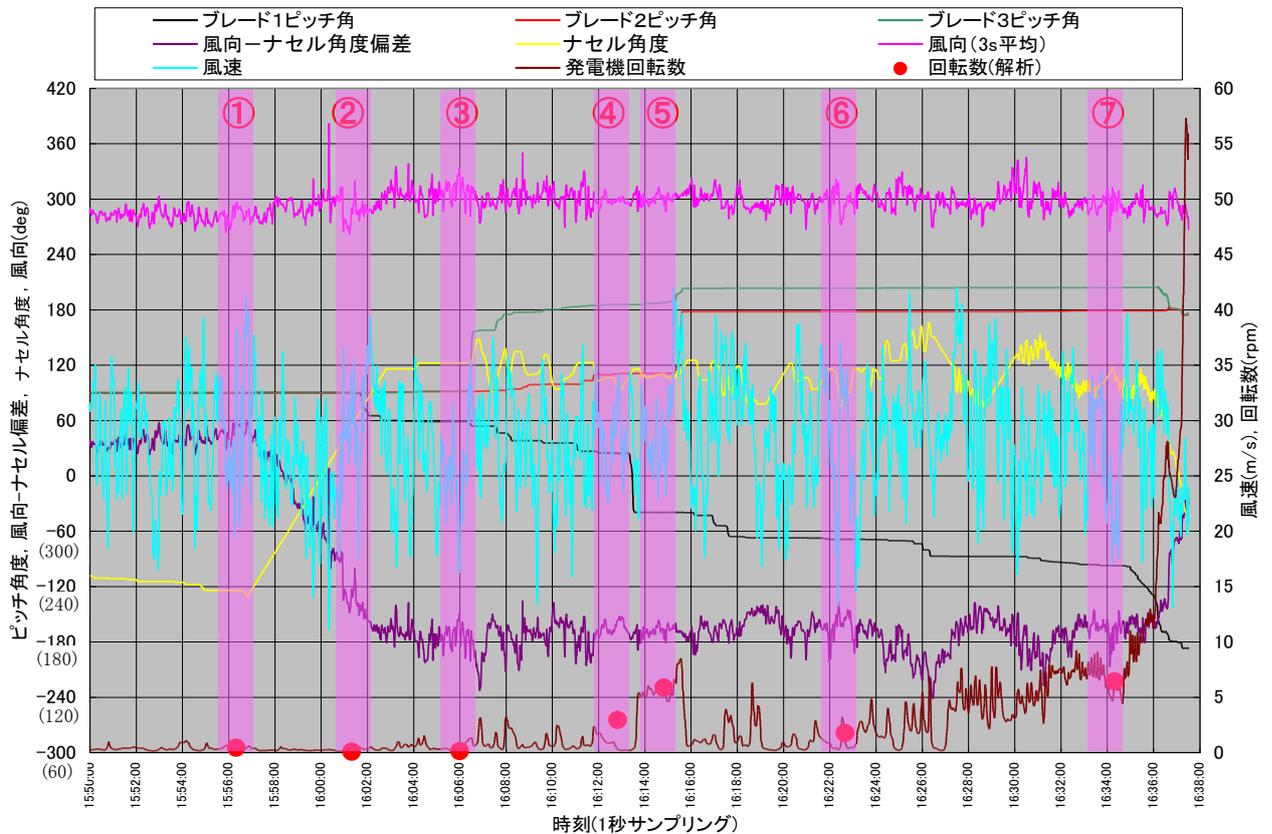
● 観察したボルト位置

(5) 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。風応答解析は実機と同様の動作を行うモデルに、風を流入させて風車各部に作用する荷重を評価する解析である。解析には、動解析ソフトウェア **Bladed** 等を用い、解析条件は以下のとおりとした。

各ブレードのピッチ角度	ログデータ値使用
風向, 風速, ナセル方位	ログデータ値使用
ウインドシア	0.2(仮定:IEC61400-1 ed.2 による)

図 5-4 に示す各時刻(①~⑦)において上記条件を入力として、100s の動解析を実施した。



解析ケース	風車の状態
①	フェザリング
②~⑤	ピッチ角が大きく変化
⑥	ブレード 3 枚ともピッチ角が変化しない
⑦	ピッチ角の変化は小さいが、発電機回転数が上昇

図 5-4 実機記録データ及び解析対象時間

※本報告書ではナセル角と風向角の表記は、360deg 表記とする方法を用いている。0deg を中心としてマイナス側の表記は()内表記の角度を示し、-60deg=300deg にて示す。

a. ピッチ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 枚のピッチ角を入力して、ピッチ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メントの解析値から、ピッチベアリングの抵抗とレデューサ※の損失を差し引き、ブレーキに働くトルクを計算したものを表 5-3 および図 5-5 に示す。表中ハッチング部は実機において、ピッチの回転が発生したケースを示している。ブレーキに働くトルクは約 12Nm~47Nm であった。また、①フェザリング時及び②ピッチが回転しないケースでは比較的トルクは小さく、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いることを確認した。

※レデューサ:減速機

表 5-3 各ブレードのピッチモータブレーキに作用したトルク 単位:Nm

ブレード No	検討ケース						
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
1	14.4	27.2	20.5	35.6	25.1	16.9	14.2
2	13.2	-27.7	-28.2	-32.3	-35.4	-27.1	-25.8
3	-12.0	-22.5	-27.6	-19.2	-46.6	-15.7	-19.0

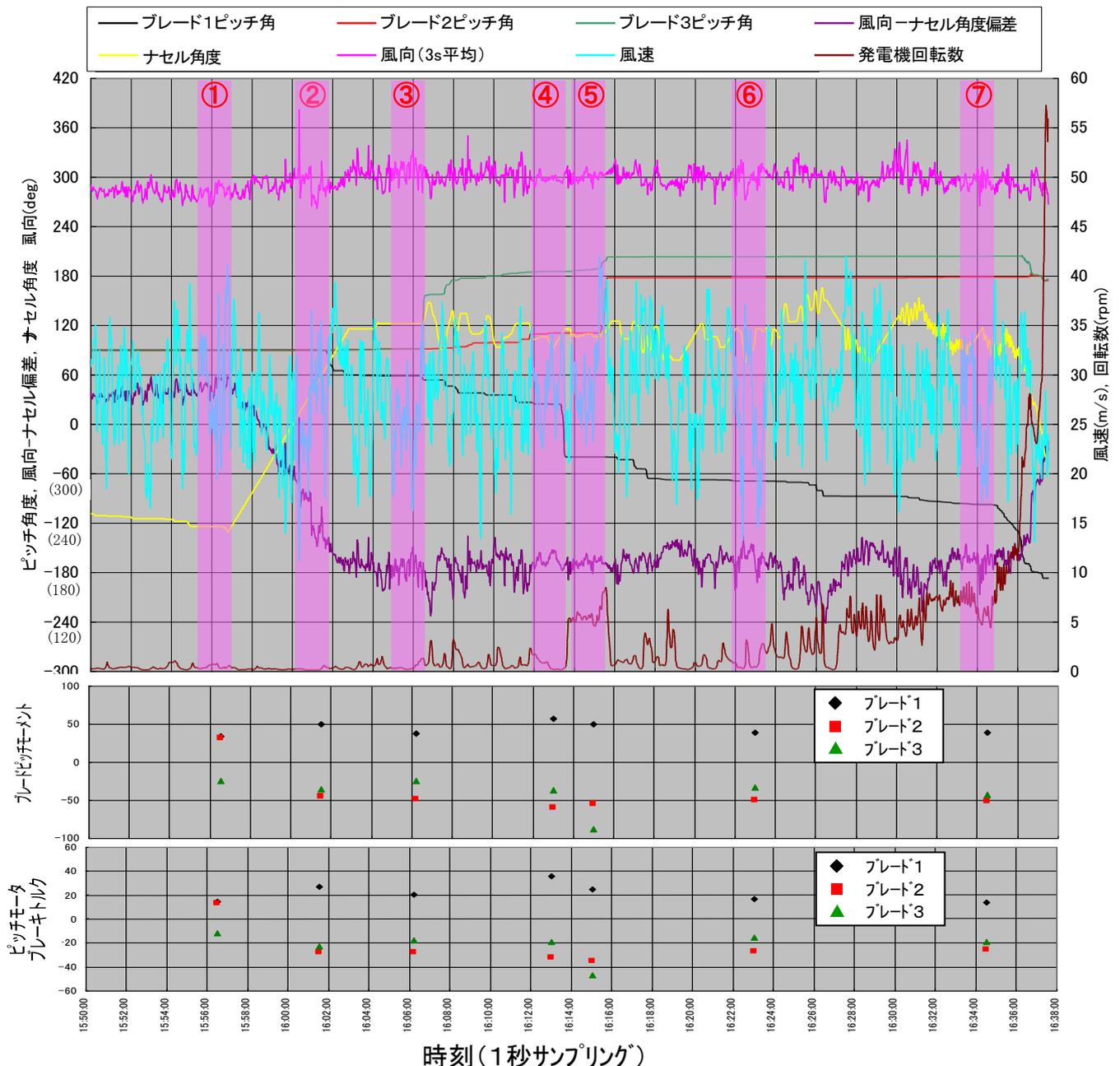


図 5-5 各解析における各ブレードに作用する最大ピッチモーメント

b. ロータが過回転に至った原因の解明

仮にブレード保持力が完全に失われていた場合、風荷重によりブレードのピッチ角が変化したとしても、本風車のブレードにおいては風の流れに対して抵抗が少ない位置(フェザリング)にピッチ角が収束し、その結果、ロータは回転しない。しかし、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。

本解析では風応答解析を用いて、事故直前の状態においてブレーキ保持力が低下した場合の風車挙動を解析し、ロータが過回転に至った原因を解明した。解析条件を表 5-4 に示す。

解析対象は事故前の 16:36:10 および 16:37:00 時点の状態からブレーキ保持力を入力し、ピッチ角の変化を確認した。ブレーキ保持力は風応答解析の結果を参考に、風荷重により 3 枚のブレードが回転する値として 31Nm を設定し、風は平均風速 30m/s、乱れ強度 21%の風を設定した。

表 5-4 解析条件

解析ケース	時刻	風向—ナセル偏差(deg)	ピッチ角(deg)			ブレーキ保持力(Nm)
			ブレード 1	ブレード 2	ブレード 3	
㊦	16:36:10	-157.5	-141.1	-181.1 (178.9)	-156.0 (204.0)	31.0
㊧	16:37:00	-66.9	-179.4	-179.9 (180.1)	-178.4 (181.6)	31.0

解析ケース㊦として 16:36:10 時点の風車後方より風を受けている状態(ストームモード)で、ロータは実機ログデータから 17rpm~21rpm で回転している条件下において、ブレーキ保持力を 31Nm に設定しブレードの挙動を解析した。解析の結果、3 枚のブレードピッチ角が初期値(ブレード 1: -141.1deg, ブレード 2:-181.1(178.9)deg, ブレード 3:-156(204)deg)から瞬時に変化して、-136deg~-138deg にほぼ同じ角度に揃うとともに、ロータは 10rpm~20rpm で回転しつづけたことで、実機データとほぼ一致することを確認した。

解析ケース㊧は 16:37:00 時点の風車斜め前方より風を受けている状態であり、この時刻よりロータが過回転に至っている。この条件下で、ブレーキ保持力を 31Nm に設定しブレードの挙動を解析した。3 枚のブレードのピッチ角は逆ファインに近い状態(-178deg~-180deg)に収束し、ロータ回転数は 36rpm まで上昇した。

以上の解析結果より、ある程度のブレーキ保持力が残存している場合、3 枚のブレードがある一定の角度に収束することでロータが回転することを確認した。更にブレードが 3 枚とも逆ファインに収束した場合には過回転に至ることを確認した。

※:本報告書ではピッチ角の表記に、360deg 表記と、0deg を中心としてプラス・マイナスで表記する方法を用いている。0deg を中心とした表記では、180deg=-180deg となり、185deg は-175deg と同じ角度を示す。

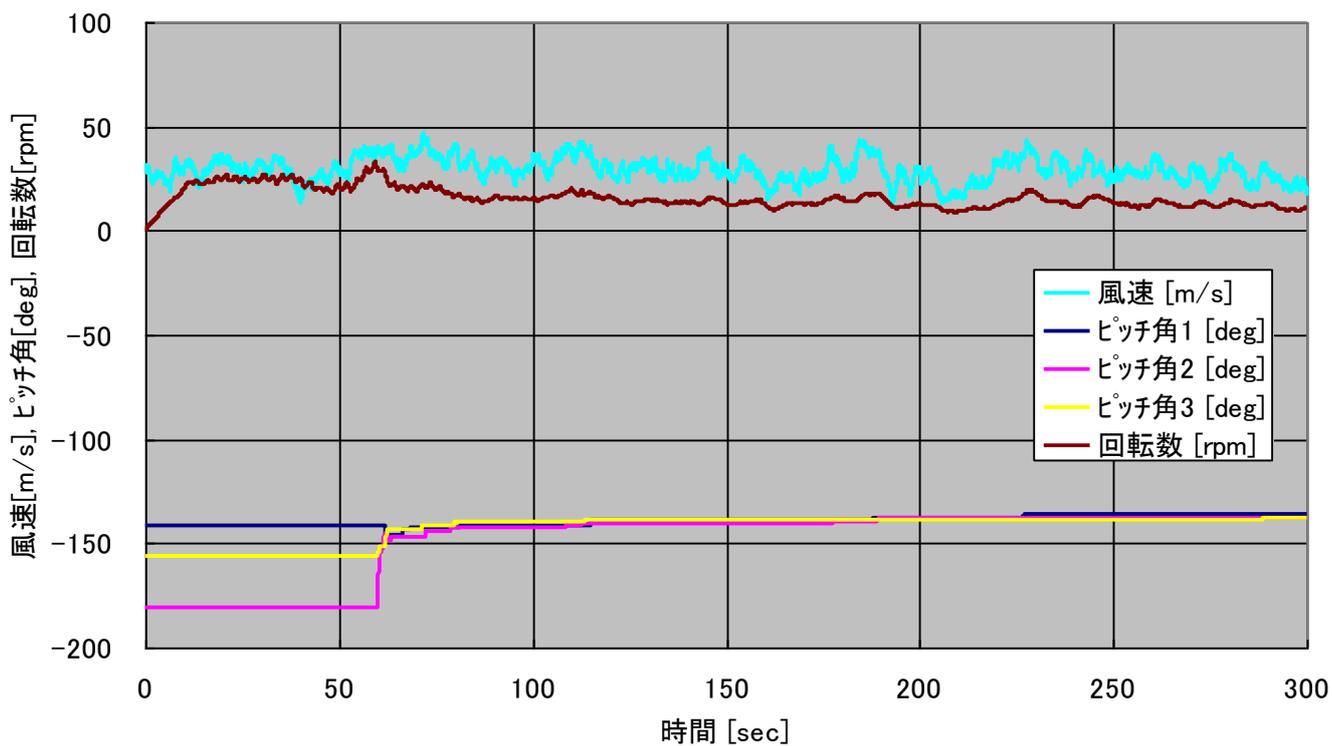


図 5-6 解析ケースア

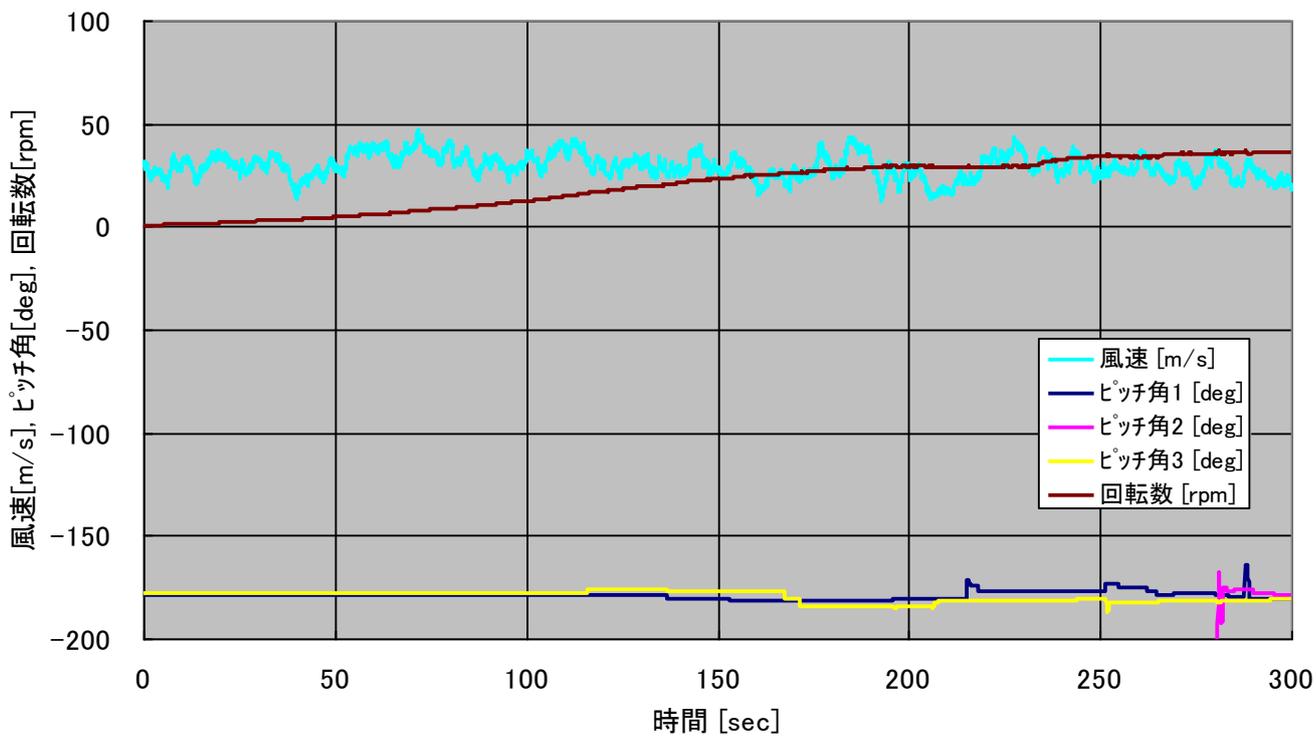


図 5-7 解析ケースイ

c.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 枚のピッチ角を入力とし、過回転に至るロータ回転数の挙動を求めた。なお、解析の入力風速は解析対象時刻(図 5-8 中の解析ケース⑧~⑩)における、風速の瞬時値を一定風速として与えた。

ロータ回転数の解析結果を図5-8の赤丸に示す。解析結果と記録データはほぼ一致し、最大で約 60rpmに達した。

また、風車が風に正対しブレードが逆ファイン状態にある場合には、ロータ回転数が上昇するほど、流入風と回転により大きな揚力が発生し、ブレードはタワーに近づく方向に変位する。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ブレード1が13.8m、ブレード2が10.6m、ブレード3が5.5mとなることから、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。(無風時の逆ファイン状態におけるブレード先端とタワーとの距離は、約5.3mである)(図5-9)

なお、風応答解析ソフトの限界から、ヨーが旋回しロータが風に正対した原因については求められなかったが、ブレードピッチ角がアンバランスの状態でもロータが回転した場合、ナセルに強い振動が発生することがわかった。この振動の他、ナセルに作用した風圧等の外力によりヨーが旋回しロータが風に正対したと考察した。

以上の風応答解析と考察から、逆ファインに近いブレードピッチ角にあった場合、ロータ回転数の上昇とともにブレードはタワーに接近し、衝突する可能性があることを確認した。

解析結果と実際のタワー損傷部位を計測した結果を図 5-9 に示す。解析結果は実測結果とほぼ一致することを確認した。ただし、計測結果の②に示す部位は解析結果と正確には一致しないことから、ナセルが落下する過程でブレードが回転しながらタワーに衝突した痕跡と考察した。

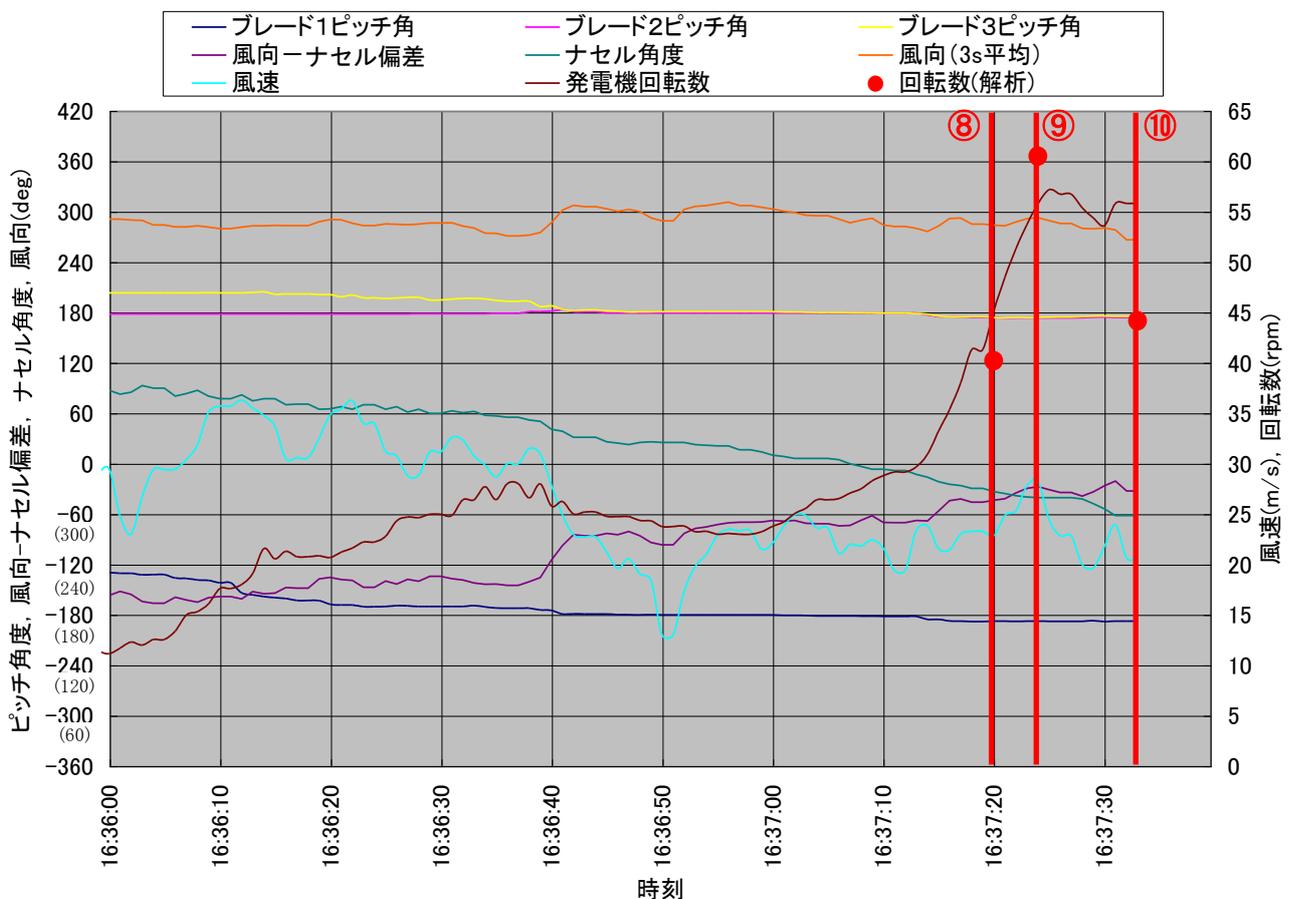
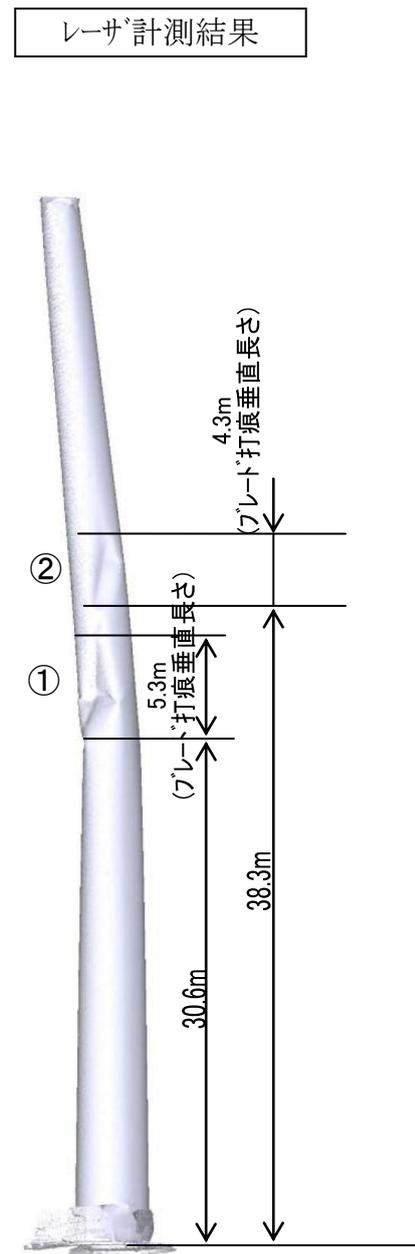
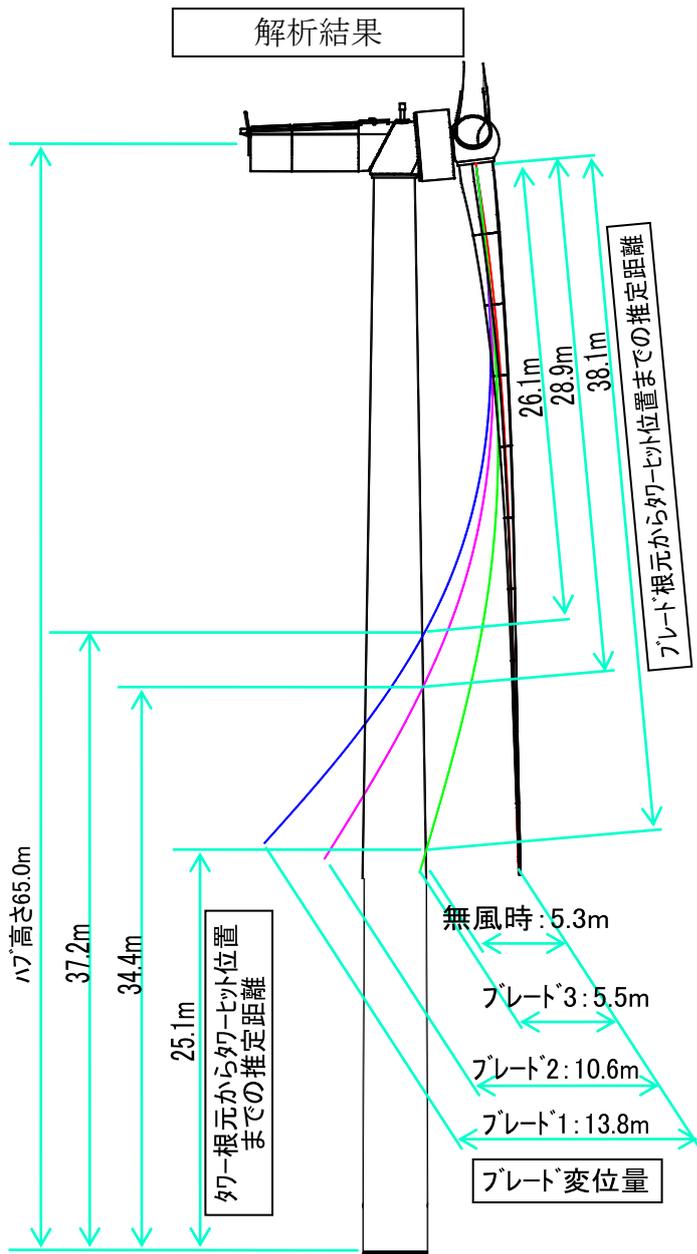


図 5-8 過回転時の解析結果

※本報告書ではナセル角と風向角の表記は、360deg表記とする方法を用いている。0degを中心としてマイナス側の表記は()内表記の角度を示し、-60deg=300degにて示す。



解析入力条件

時刻	16時37分33秒	
風速	21m/s(ログ1秒値)	
風向	267deg(ログ3秒平均値)	
ナセル角度	299deg(ログ1秒値)	
風向-ナセル偏差	-32deg(ログ3秒平均値)	
ピッチ角	1軸	-187deg(ログ1秒値)
	2軸	175deg(ログ1秒値)
	3軸	176deg(ログ1秒値)
ロータ回転数	解析値	-45rpm
	実機ログ	-53.19rpm(1秒値)

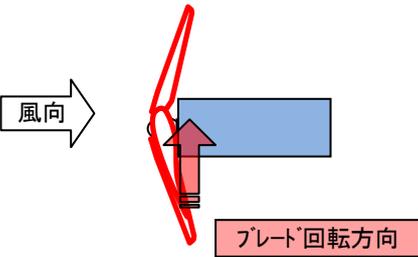
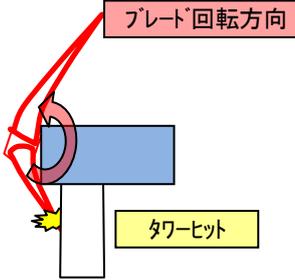
図 5-9 過回転時におけるブレード変位置とタービット位置の推定と計測結果

6. 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判明したナセル落下に至る過程と事故原因として以下のとおりまとめた。

(1) ナセル落下に至る過程

風車の動き	ナセルを上方から見た図	横から見た図
ブレード 1~3 はフェザリング状態		
ストームモードに移行中及び移行後に、ブレードのピッチ角が流入風及びロータ回転による風荷重により変化		
ピッチ角度の空力バランスによりロータが逆回転(推定)を始める。ロータ方向は風下方向を維持		
流入風及びロータ回転による風荷重により、3枚のブレードピッチ角が逆フェイン状態に移行し始める		
ヨーが風上側へと旋回を開始		
ロータ回転数の上昇とともに、ナセルが風上側へ旋回		

風車の動き	ナセルを上方から見た図	横から見た図
<p>ロータが風にほぼ正対となり、流入風と回転による揚力によりブレードがタワー方向に大きく変位し、タワーに接触(タワーヒット)した</p>		
<p>【タワーヒット～ナセル落下まで】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・タワーヒットの衝撃荷重により、ナセル回転中心(＝タワートップ中心)周りにトルクが発生した。 ・発生したトルクがナセル・タワートップ結合ボルトに作用。ボルトのせん断強度を超えるせん断応力によりせん断破壊した。 ・ナセル・タワートップ結合ボルトの破断によりナセルが落下した。 		

(2) 事故原因

- ① 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ライニングが摩耗したことで、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ァインになったことで、ロータの過回転が発生した。なお、ピッチモータブレーキの保持力低下を事前に検出する機能はなかった。
- ② 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。
- ③ 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、調査の結果、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。

7. 再発防止対策

(1) 既設 18 基のピッチモータブレーキの点検と対策品への交換

事故機以外のWP笠取18基について、ピッチモータブレーキが健全であるか点検を実施する。点検の結果、異常(スプラインの摩耗、ブレーキ保持トルク不良)を確認した場合には、健全なブレーキに交換する。

a. 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

スプラインの摩耗は、一般にメス側とオス側の硬度差が大きい場合に発生すると言われている。今回の摩耗は、オス側の硬度Hv180～230※(材質:鋼製)に対し、メス側がHv100(材質:アルミ合金製)と低いために発生したものと考えられる。このため、オス側と同等の硬度を有する材料を選定することが必要である。一方、電磁石からの磁力の回りこみを防止するため、非磁性材料が要求される。これら二つの条件を満足する材料としてオーステナイト系のステンレス鋼を選定することとした。表7-1にこれらの材料特性を比較したものを示す。

※Hv:ビッカース硬さ、工業材料の硬さを表す尺度の一つ

表 7-1 スプライン材質の特性の比較

部位	材質	硬度 (Hv)	引張強度 (MPa)
スプラインオス側(変更なし)	鋼製	180-230	570
スプラインメス側 従来品	アルミ合金製	100	345
スプラインメス側 対策品	ステンレス製	180	520

b. ブレーキディスク対策品の摩耗寿命耐久試験

① 試験概要

対策品の摩耗寿命を評価するため、従来のアルミ合金製と対策品のステンレス製ブレーキディスクについて、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る試験を行い、スプラインのガタ(角度)の変化量を計測し比較評価することとした。

ここで、J82 風車の疲労解析結果を基に、レインフロー法とマイナー則に従って、20年間の風車稼働に相当するブレードねじり方向の等価疲労モーメントを算出した結果、ピッチモータ軸に作用する 100 万回相当の等価疲労モーメントは 85.8Nm となることから、この条件にて耐久試験を実施することとした。

表 7-2 摩耗寿命耐久試験概要

項目	内容
試験材	ステンレス製ブレーキディスク(対策品) アルミ合金製ブレーキディスク(従来品, 比較用)
試験方法	試験材を AC サーボモータに直結し、トルク制限を掛けた状態で正逆回転にて運転させた際のスプラインのガタ(角度)の変化量を計測
負荷トルク	85.8Nm
運転サイクル	0.05 秒運転し 0.95 秒停止。その後、逆回転させる。
運転回数	1,000,000 回

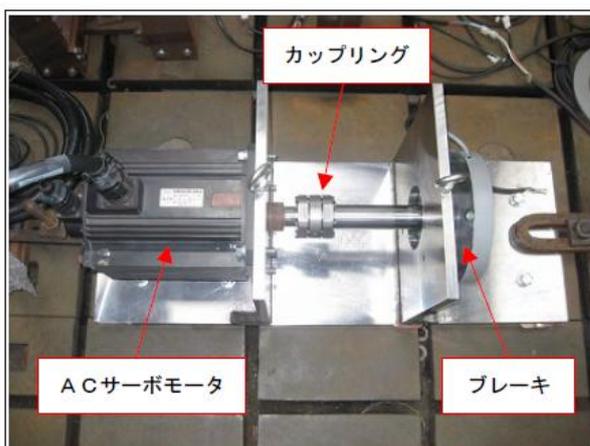


写真1 試験装置



写真2 試験状況

② 試験結果

表 7-3 従来品と対策品の寿命試験結果

	試験前ガタ		試験後ガタ		ガタ変化量	
	角度 (deg)	ピッチ円 (mm)	角度 (deg)	ピッチ円 (mm)	角度 (deg)	ピッチ円 (mm)
従来品	0.088	0.046	0.384	0.201	0.296	0.155
対策品	0.088	0.046	0.132	0.069	0.044	0.023

③ 評価

ガタ変化量は従来品 0.296deg (0.155mm) に対して対策品 0.044deg (0.023mm) と、従来品と比較して 7 分の 1 程度まで減少したことから、対策品の摩耗寿命は大幅に改善できると評価した。

対策品の摩耗寿命を正確に求めることは困難であるが、WP 笠取の実績から従来品の摩耗寿命は最短で 1 年 6 ヶ月程度であったこと、および今回の試験結果から摩耗に対する寿命が単純に従来品の 7 倍になったものと考え、対策品の摩耗寿命は 10 年程度と想定出来る。

以上のことから対策品を採用し、今後は消耗品としての位置付けで管理する。

(2) ピッチモータブレーキの性能を維持するための点検マニュアルの整備

ピッチモータブレーキの健全性を確認するため、6ヶ月毎に点検を実施して状態を観察し、その結果によって交換等の必要な処置を行う。

- ① ブレーキギャップのギャップ量が管理値内であることを確認する。
- ② ギャップ量が管理値から外れている場合、ブレーキユニットの交換を行う。

(3) ピッチモータブレーキ保持力のチェック機能追加

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、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。実施は低風速時に、フェザリング状態にて 1 軸ずつ行う。

低気圧(台風含む)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。

<ブレーキテストの方法>

- ① 風車制御 PLC からのブレーキ保持力テスト実施指令を出す。
- ② フェザリング角度 (90deg) でのブレーキ保持力テストを開始する。
- ③ 1 軸目のモータにブレーキが掛かっていない状態のモータトルクを記録する。
- ④ ブレーキを掛け、ブレードを 100deg 方向に回転するようにピッチドライバからモータに 1 秒間要求トルクを掛ける。掛けたトルクはピッチドライバで計算し記録される。
ピッチ角度が変化しないこと(正常)をエンコーダ出力で確認する。ピッチ角度が変化した場合(異常時)は PLC に警報信号を返す。
- ⑤ 数秒間のピッチドライバ冷却後、再度③の作業を実施し、モータトルクを記録する。
- ⑥ 再度ブレーキを掛け、今度はブレードを 0deg 方向に回転するようにピッチドライバからモータに要求トルクを掛ける。掛けたトルクはピッチドライバで計算し記録される。
ピッチ角度が変化しないこと(正常)をエンコーダ出力で確認する。ピッチ角度が変化した場合(異常時)は PLC に警報信号を返す。
- ⑦ 同様に 2 軸, 3 軸も実施する。

(4) 回転数制御によるロータ過回転防止機能の追加

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、コンバータ制御により発電機をモータ駆動させ、ロータ回転数を抑えるように制御する。

PLC からの風車停止指令にもかかわらずロータ回転数(入力値)と経過時間(入力値)が許容値を超えたことを PLC が検知した場合、異常回転エラー(異常)を発報するとともに、風車制御プログラムでは過回転防止制御(Emergency Motoring)が開始される。

この時、コンバータ側がエラー停止していた場合は、自動でリセットを行い、稼動状態とする。

風車制御プログラムが開始すると、PLC はコンバータ側に発電機をモータ駆動する指令を出し、検出されたロータ回転数を零回転にするよう発電機ステータコイルに電流を流し逆トルクを掛ける(非常モータリング)。コンバータは発電機端子電圧をモニタリングすることで電圧の正相・逆相からロータの回転方向を判断し、トルクを発生することで回転数を押さえ込むことが可能となる。

このプログラムは過回転防止制御(Emergency Motoring)操作の停止指示(手動入力)が出力されるまで継続される。

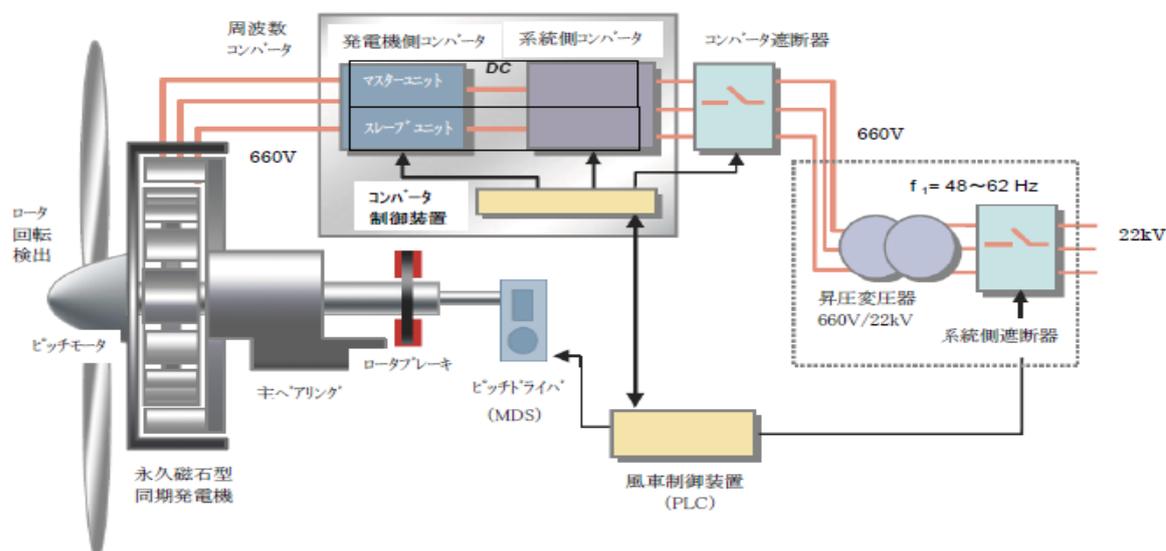


図 7-1 モータリング機能

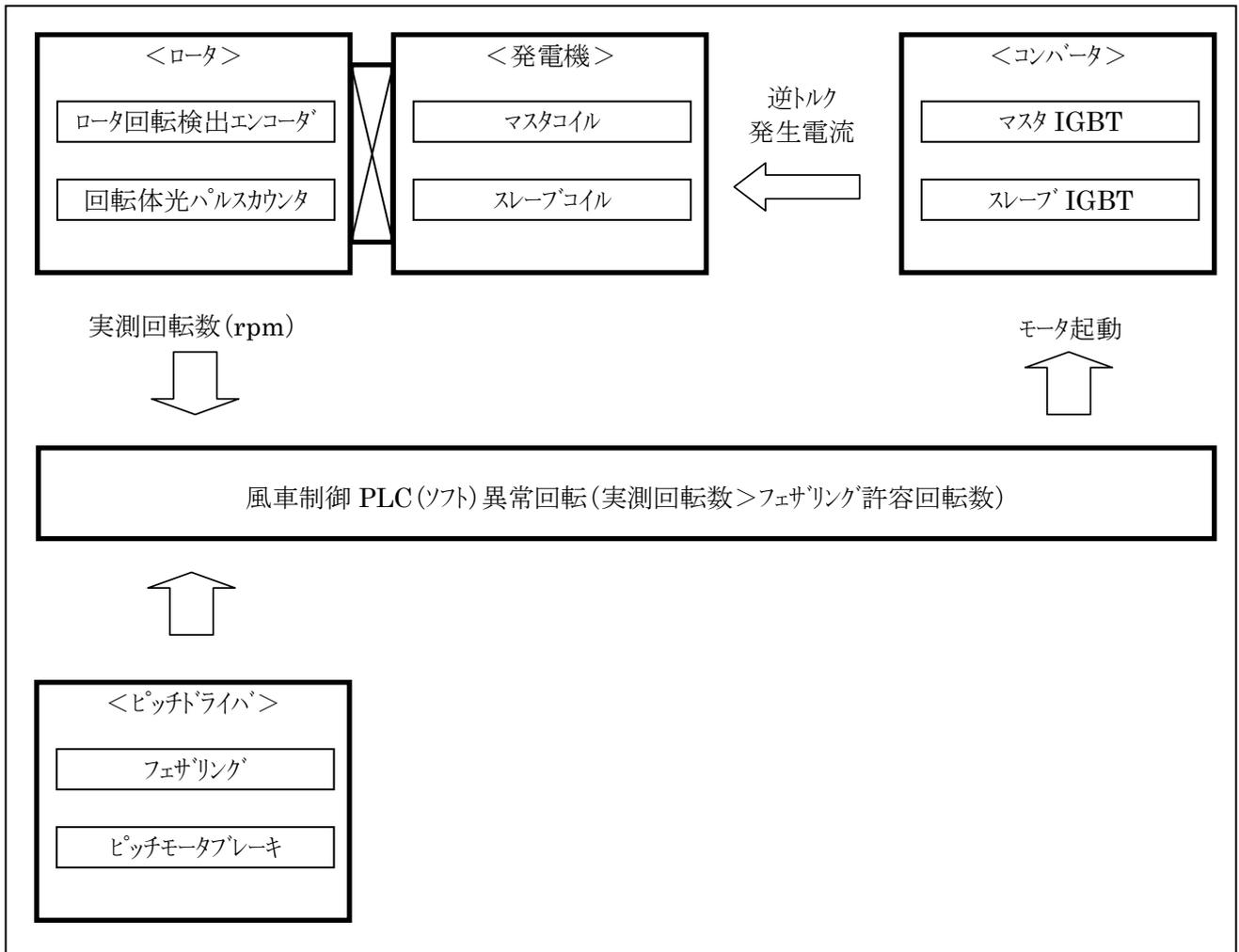


図 7-2 回転数制御によるロータ過回転防止機能のブロック図

表 7-3 ナセルが落下した根本原因と再発防止対策のまとめ

問題点	根本原因	対 策	実施時期
ピッチモータブレーキが正常に機能せず、3枚のプレートがフェザリング状態を保持出来なくなった。	1. 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、異常摩耗が発生した。	1-1. スプラインの材質をアルミ合金より耐摩耗性能が優れるステンレスに変更する。 (材質変更にあたっては100万回繰返し評価試験により、耐摩耗性能はアルミ合金製に比べ約7倍に向上することを確認した。)	済 (~4/27)
		1-2. ピッチモータブレーキの性能を維持するため、点検周期の見直しとマニュアルの修正を行い、材質変更の効果を確認する。 ①ピッチモータブレーキの点検周期を1回/3年から1回/6ヶ月に見直す。 ②ブレーキギャップのギャップ量が規定値内であることを確認する。	済 (~5/31)
	2. ピッチモータブレーキの保持力低下を事前に検出する機能はなかった。	2. ピッチモータのブレーキ保持力のチェック機能を追加する。 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、自動的にプレート1枚ごとにモータに所定のトルクを掛け、モータが動かない(ブレーキの保持力が所定のトルクを上回っている)ことを確認する。 また、低気圧(台風含む)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。	~6月末
ロータ過回転が発生したが、回転を抑制することが出来なかった。	3. 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。	3. 回転数制御によるロータ過回転防止機能を追加する。 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、コンバータ制御により発電機をモータ駆動させ、ロータ回転数を抑えるように自動制御する。	~6/21

(注) 上記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。

8. 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ライニングが摩耗したことで、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とことにより、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。

【ウインドパーク笠取 ナセル脱落事故調査委員会 名簿】

委員長

勝呂 幸男 日本風力エネルギー学会 会長

委員

石原 孟 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 博士(工学)

前田 太佳夫 三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授 博士(工学)

杉田 雄二 中部電力株式会社 顧問

野坂 敏幸 株式会社シーテック 代表取締役社長

事務局長

小西 暁 株式会社シーテック 再生可能エネルギー事業部長

事務局

柴野 潤一 株式会社シーテック 再生可能エネルギー事業部 担当部長

伊藤 眞治 株式会社シーテック 再生可能エネルギー事業部 総括 G 長

佐藤 裕之 株式会社シーテック 再生可能エネルギー事業部 総括 G 担当課長

天田 亨 株式会社シーテック 再生可能エネルギー事業部 風力発電 G 長

【ウインドパーク笠取 ナセル脱落事故調査委員会 開催実績】

《第1回委員会》

日 時 : 平成 25 年 4 月 18 日 13 時～15 時

場 所 : (株)日本製鋼所 本社

実施事項: ・ナセル脱落事故報告・審議
・事故発生時の気象状況, 運転状況報告・審議
・事故原因究明の方針報告・審議

《第2回委員会》

日 時 : 平成 25 年 4 月 24 日 9 時 30 分～12 時

場 所 : (株)日本製鋼所 本社

実施事項: ・ピッチモータブレーキ分解調査結果の報告・審議
・ナセル, タワー結合ボルト破断面調査結果の報告・審議
・風応答解析に基づく事故発生メカニズムおよび原因究明の報告・審議
・事故原因および再発防止策の報告・審議

《第3回委員会》

日 時 : 平成 25 年 6 月 4 日 14 時～17 時

場 所 : (株)日本製鋼所 本社

実施事項: ・風応答解析に基づく事故発生メカニズムおよび原因究明の報告・審議
・再発防止策検討結果の報告・審議

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 (概要版)

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

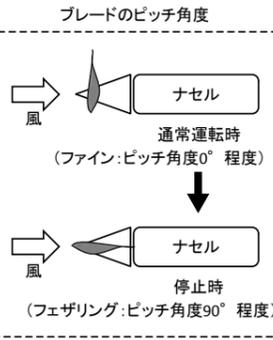
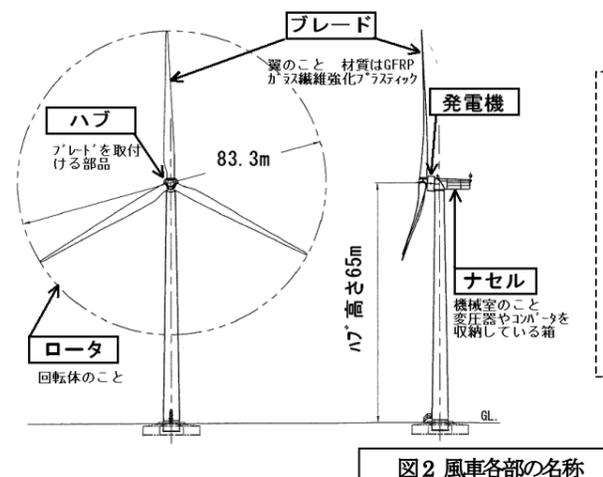
- ・所在地：三重県津市美里町および伊賀市上阿波地内（CK-19号機は津市美里町）
- ・定格出力：38MW(2,000kW×19基)
- ・運転開始：第1期平成22年2月22日
第2期平成22年12月15日（CK-19号機は第2期）

(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



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(ノット上で24rpm以上)発生。
- ・16:36:28 ロータ・発電機過回転(ノット上で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に正対方向へ向う)
- ・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】

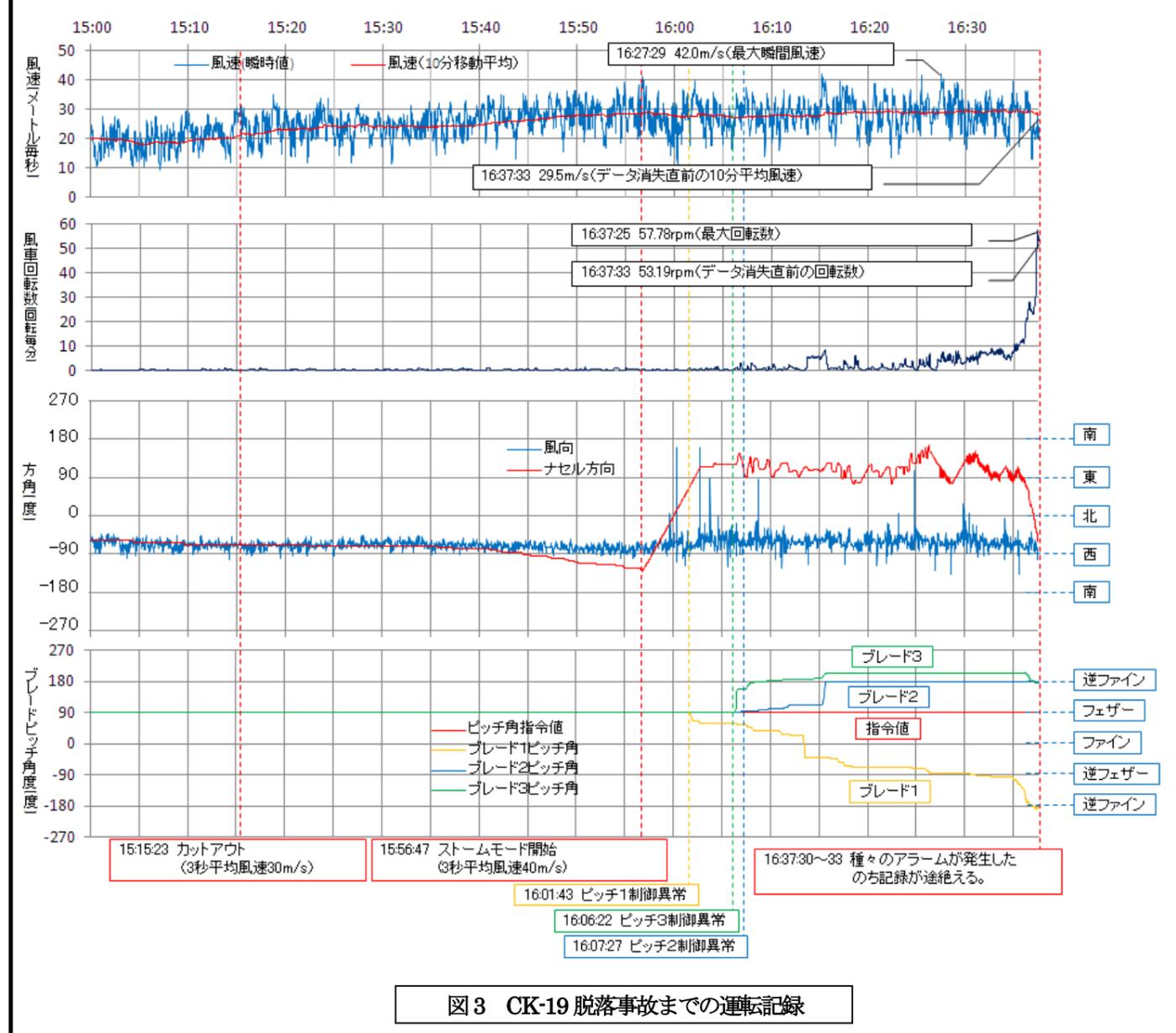
- ・ピッチ1制御異常が発生(16:01:43)後、16:13頃から徐々にピッチ角が26degから-187degとなり逆フィン状態となる。
- ・ピッチ2制御異常が発生(16:07:27)後、16:15頃から急激にピッチ角が175degとなり逆フィン状態となる。
- ・ピッチ3制御異常が発生(16:06:22)後、急激にピッチ角が92degから176degとなり逆フィン状態となる。
- ・16:36:28以降において3枚のブレードピッチ角が逆フィン状態に揃い、過回転状態となる。

【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。



風車の脱落状況

【タワー】

・ターは、ドムタワーの中央部付近(地上より 30.6m、38.3mを低部としての)2箇所にてブレードが衝突し、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。

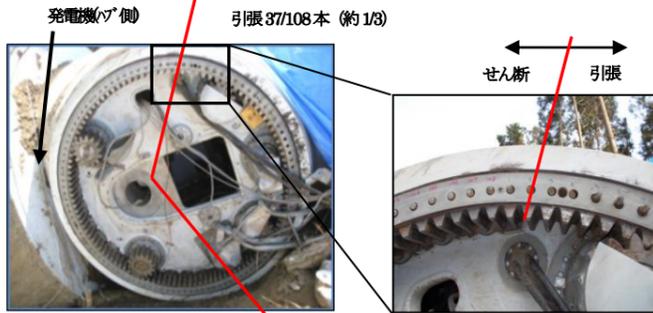


写真2 フランジ面ボルト状況

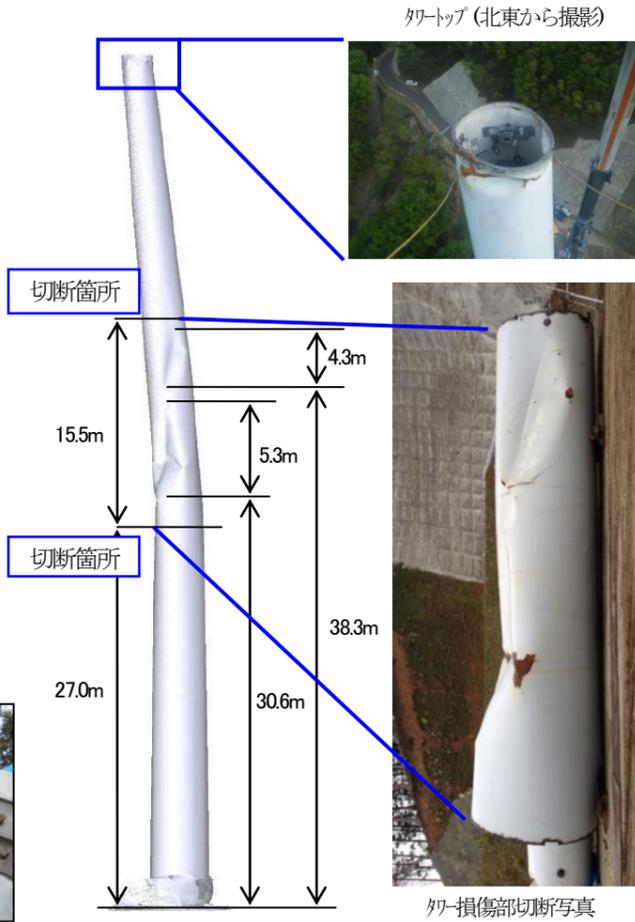
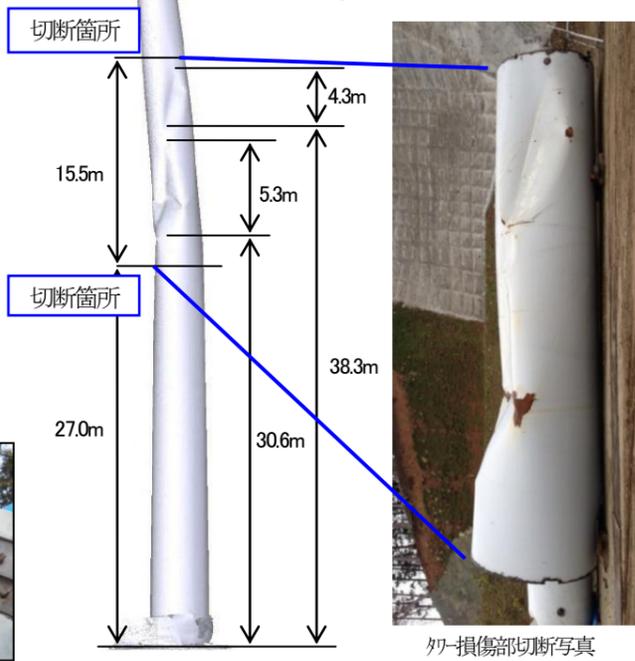


写真3 ター損傷部切断写真



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軸共に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)にて回転した。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】

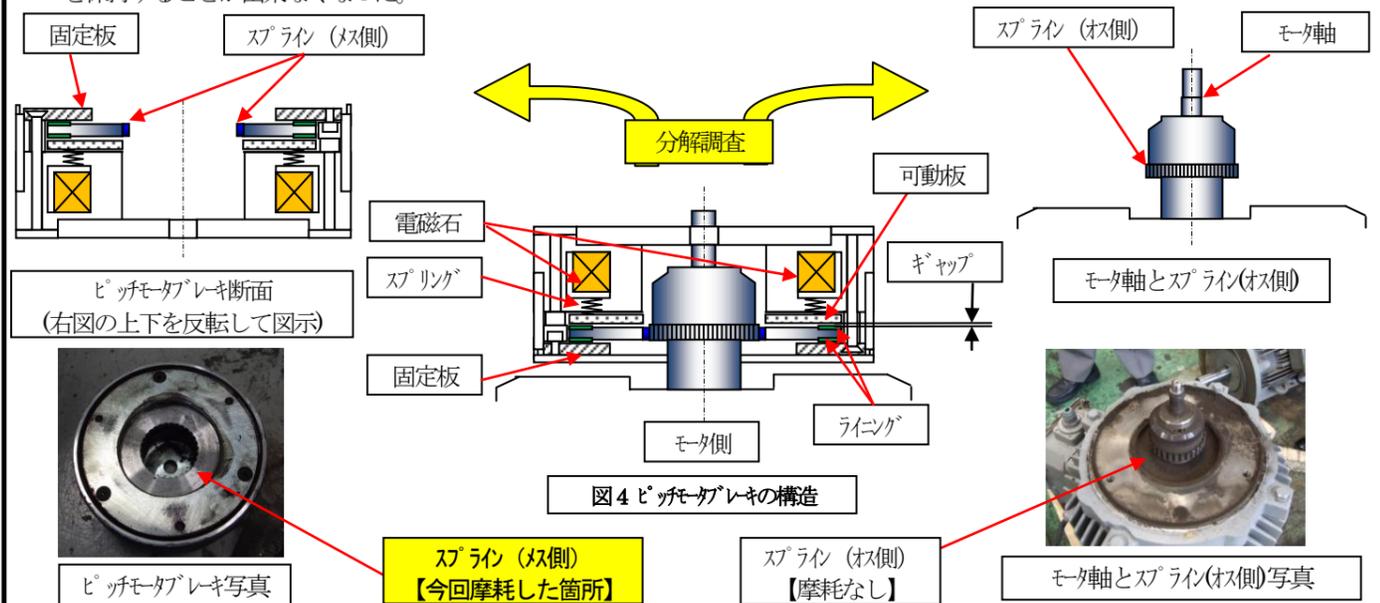
- ① ピッチモータブレーキの保持トルク測定結果は最大でも 34.5Nm であり、3台とも規定値の 200Nm を下回っていた。
- ② 3台ともピッチモータブレーキを構成するスプライン(メス側)の歯が三角形に摩耗しており、その摩耗粉と推定される粉を確認した。
- ③ スプライン(メス側)は摩耗しているものの、歯山の高さは設計基準値を満足していた。(スプライン自身は空回りしていない。)
- ④ ブレーキを保持するギャップは 2.0mm~2.4mm であり、3台とも規定値(0.15mm~0.35mm)を逸脱する値であった。

※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	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				
		三角形に歯が摩耗 歯山高さ: 2.23mm	三角形に歯が摩耗 歯山高さ: 2.29mm	三角形に歯が摩耗 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)の摩耗が進んだ。(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・固定板との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、スプリング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。



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(疲労表面) ストライエーションの例

【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。

【モーターブレイ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、モーターブレイ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、ピッチリングの抵抗とレダクタ(減速機)の損失を差し引き、ブレイキに働くトルクを計算すると、モーターブレイ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、ある程度ブレイ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枚とも逆風の角度に移行し、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風状態になり、ロータが過回転になったために、ブレードはタービン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はタービンに衝突する可能性が高い。(無風時の逆風時には、ブレード先端とタービンとの距離は約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。

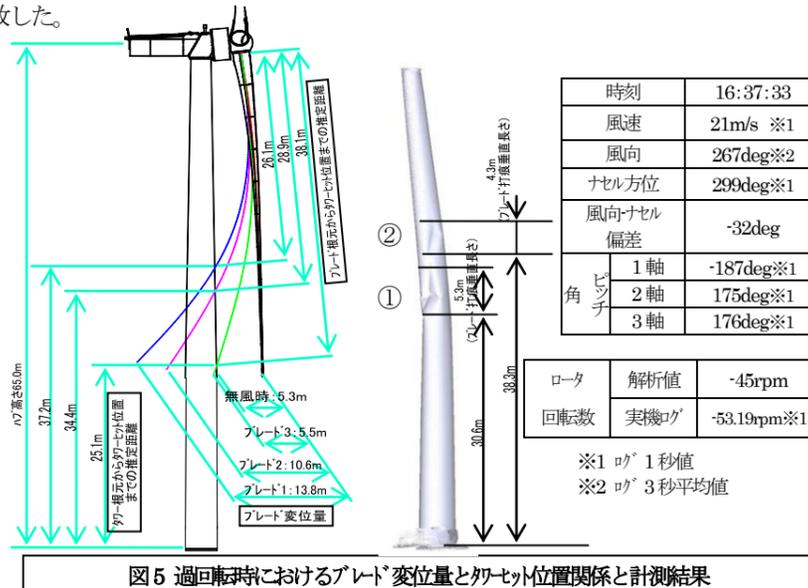


図5 過回転時におけるブレード変位量とタワーヒット位置関係と計測結果

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。

- ピッチモータブレイ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、ブレーキリング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イ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風になったことで、ロータの過回転が発生した。尚、ピッチモータブレイ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、ブレードがタービンに接触し、ナセルとタービン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イ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イ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に策定した。

- ピッチモータブレイ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、スプラインのガタ(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。
 - ピッチモータブレイ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。
- ピッチモータブレイキの性能を維持するための整備(予防保全)

ピッチモータブレイキ保持力が正常であることを確認するため、ブレイキを掛けた状態で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時および通過後には、適宜手動にて実施し、ブレイキ保持力が正常であることを確認する。
- 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.ピッチモータブレイキを構成するスプラインの材質変更> ・耐摩耗性の低い、或いはブレイキ力の低いピッチモータブレイキは、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)
2 ピッチモータブレイキの保持力低下	<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。 <2.ピッチモータのブレイキ保持力のチェック機能追加> ・ピッチモータのブレイ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、ブレイキ保持力が正常であることを確認する。	済(~5/31) ~6末
3 過回転防止機能の不足	<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、ピッチモータブレイキの分解調査、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イ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リングが摩耗したこと、3枚のブレードともピッチ角を保持するブレイ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風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、ブレードがタービンに接触し、ナセルとタービン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、ピッチモータブレイ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、風力発電所の長年に亘る安全運転に努めていく。