# 的山大島風力発電所

## 台風9号・10号によるブレード折損事故に関する報告　（第3報）

2021年9月9日

株式会社的山大島風力発電所

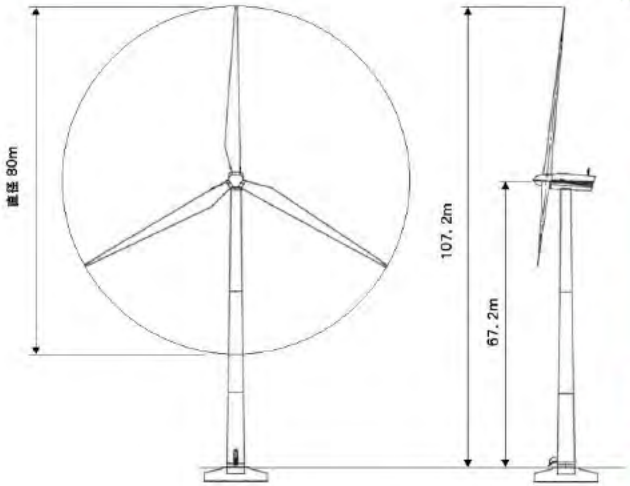
# 目　次


- 風力発電所の概要 …… P. 3
- 事故の概要 …… P. 4
- 第26回 新エネWG時　質問事項回答 …… P. 6
- 前回の報告内容との比較 …… P. 10
- 事故原因究明・再発防止対策検討フロー …… P. 11
- 事故発生時風車挙動 …… P. 12
- 破損部品の確認 …… P. 16
- 最大風速の推定 …… P. 18
- 台風時の強風解析 …… P. 21
- 風車設備の荷重シミュレーション算出結果 …… P. 23
- 事故原因の推定 …… P. 26
- 事故原因分析 …… P. 29
- 事故原因まとめ …… P. 30
- 再発防止対策 …… P. 31
- 安全対策 …… P. 32
- 補足資料 …… P. 33

# 風力発電所の概要

| | |
|---|---|
| 事業者名 | 株式会社的山大島(あづちおおしま)風力発電所 |
| 出資比率 | ミツウロコグリーンエネルギー:75%　平戸市:25% |
| 発電所名 | 的山大島風力発電所 |
| 所在地 | 長崎県平戸市大島村前平 |
| 定格出力 | 32,000kW　(2,000kW×16基) |
| 運転開始 | 2007年3月 |
| 風車メーカー | Vestas Wind Systems A/S |
| 機種 | V80-2.0　定格出力:2,000kW |
| 風車クラス | IECクラス:1A　設計風速50m/s(10min.ave) |
| ローター直径:80m　ナセル本体:地上より67.2m | |
| カットイン:4m/s　定格風速:15m/s　カットアウト:25m/s | |

※Vestas仕様書による




ブレード長さ:39m

重量:6,500kg / 1枚

的山大島風力発電所　位置地図

# 事故の概要

## 台風9号時

2020年9月2日夕方から9月3日早朝にかけ、台風9号が的山大島の西側を通過した。このとき、発電所の風車全16機のうち8号風車、13号風車、16号風車の3機のブレードが破損した。

風車は台風通過前に風速25m/sのカットアウト風速を超えたため、保安停止中の7号風車を除き、全機自動でPause状態に移行していた。

Pause状態：風車は発電停止し、ブレードピッチはフェザリング状態で、ヨーは自動追従となります

8号風車:ブレード3枚破損

13号風車:ブレード1枚破損

## 台風10号時

台風9号通過から中2日、2020年9月6日夕方から9月7日早朝にかけ、台風10号が的山大島の西側を通過した。このとき、7号風車のブレードが破損した。

台風9号通過時に発生した故障により、事故機である4機については、ヨーイングに異常が生じており、風向の変化に追従できない状態となっていた。

16号風車:ブレード2枚破損

7号風車:ブレード1枚破損

# 事故の概要

| | 台風9号通過時状況 | 台風9号通過後 |
|---|---|---|
| 7号機 | 9月2日20:50～ :ローターロック破損によりローターの回転が確認される<br>9月2日22:08 :最大瞬間風速46.7m/sを記録<br>風向157.8° ナセル角154.4°<br>風車制御コントローラダウンにより以降データ欠測 | ナセル方向が10～15° 方向となっていた。<br>目視によるブレード点検異常なし<br>ローターロックピン破損<br>ブレーキキャリパー周辺部破損<br>ヨーウォームギア破損 |
| 8号機 | 9月2日23:58 :Pitch div.エラー等発生<br>Q16制御電源トリップ<br>最大瞬間風速51.8m/sを記録<br>風向151.7° ナセル角326.9°<br>9月3日00:56 :ブレード3枚破損を確認 | ナセル内ホイストが制御盤に衝突<br>690V回路に接触し短絡<br>ピッチシリンダ破損<br>ヨーウォームギアクラッチ板破損 |
| 13号機 | 9月2日23:07 :Low oil-levelエラー発生<br>9月2日23:30 :制御コントローラダウン<br>最大瞬間風速51.9m/sを記録<br>風向123.9° ナセル角304.2°<br>9月3日03:47 :ブレード1枚破損を確認 | ピッチシリンダ破損<br>ハブ用電源ブレーカトリップ<br>制御系24V回路故障<br>ヨーウォームギアクラッチ板破損 |
| 16号機 | 9月2日23:22 :Pitch div.エラー等発生<br>9月3日00:21 :制御コントローラダウン<br>最大瞬間風速51.9m/s<br>風向141.4° ナセル角309.8° | 9月3日14:00 :巡視点検時ブレード2枚破損を確認<br>ピッチシリンダ破損<br>ハブ～ナセル間通信線破損<br>ヨーウォームギアクラッチ板破損 |

| | 台風10号通過時状況 | 台風10号通過後 |
|---|---|---|
| 7号機 | 台風9号時にローターロックピン破損<br>風車制御コントローラダウンによりヨー制御不可能な状態 | ブレード1枚破損を確認 |

# 第26回 新エネWG時　質問事項回答

Q ： ヨーモーターについて （ヨーモーターはステッピングモーターか）

A ： ヨーモーターはACモーターであり、非動作時は無励磁作動型の電磁ブレーキが作用する。
通常時はナセルに外力が加わった際に、トルクリミッタが動作（クラッチが滑る）することにより、ヨーギア等の保護を行う。

Q ： 建設時の想定風速について

A ： 風車建設前に行われた2年間の気象観測ポールの観測データを元に、ベスタス社が作成した的山大島サイトでの年間の発電量予測（Production Estimate）の資料内に、ハブ高での暴風時の風速として、Extreme wind speed (10min.ave) at hub height：44m/s と記載されていたものであり、当社にもベスタス社にもその算出過程は残されていない。

また、建築確認申請時の長崎県平戸市の基準風速は34m/s（10min.ave）
（平成12年建設省告示第1454号による）であり、建築確認申請はこの数値を基に許可されている。

# 第26回 新エネWG時　質問事項回答

Q　風車設計について

A　風車支持物 ： 当時の設計指針に従い建築基準法に基づく審査を受けている。
　　風車本体　 ： 認証機関より型式認証を受けている。

（※建築確認申請書類については別途提出）

(1)風車構造設計について
　風車構造設計については、建設当時の法令、規準に従い各計算が行われた。
　これを、2006年3月に建築確認申請を行い、2006年4月に建築主事の確認を受けている。

(2)風車本体設計について
　当該風車は、GL社(Germanischer Lloyd社:第三者機関)により、IEC61400-1 ed.2 Class1Aの型式認証を受けている。

長崎県平戸市の基準風速:34m/s、風車ハブ高さ:67.2mにおける粗度区分Ⅱでの極値風速については以下の数値となる。

10分平均の50年再現期待値　：　$U_h$ **= 45.1 (m/s)**
3秒平均の50年再現期待値　：　$U_{e50}$ **= 67.1 (m/s)**　（算出過程については補足資料参照）

いずれも、IECの基準である、10分平均:50(m/s)、3秒平均:70(m/s)を超えておらず、建設当時の風車機種選定については問題なかったと考える。

# 第26回 新エネWG時　質問事項回答

Q ： 風向風速計の仕様・性能等について

A ： 新規に取付ける予定の風向風速計については、現行の0-50m/s対応の製品と、同一メーカーの後継品を使用する。
計測部の外形寸法が1mm大きい程度で風車コントローラとの通信プロトコルや取付マウント形状も同一であり、現在、当該風車同一機種に取付けて試験運用を行っているが、計測等特に問題は発生していない。

| 風向風速計について | | 現行　風向風速計 | 新規　風向風速計 |
|---|---|---|---|
| メーカー名 | | FT Technology | FT Technology |
| 型番 | | FT702 | FT742 |
| 計測方式 | | 超音波式 | 超音波式 |
| 風速 | 測定範囲 | 0-50m/s | 0-75m/s |
| | 分解能 | 0.1m/s | 0.1m/s |
| | 計測精度 | ±0.5m/s(0-15m/s)<br>±4%(>15m/s) | ±0.3m/s(0-16m/s)<br>±2%(0-40m/s)<br>±4%(40-75m/s) |
| 風向 | 測定範囲 | 0 to 360° | 0 to 360° |
| | 分解能 | 1° | 1° |
| | 計測精度 | ±2° | 2° RMS |
| 使用条件 | 動作温度範囲 | -40° to +85° C | -40° to +85° C |
| | 湿度 | 0-100% | 0-100% |
| | 保護等級 | IP67 | IP66,IP67,IPX6K |
| | 寸法 | φ55×161mm | φ56×161mm |
| | 重量 | 320g | 320g |

# 第26回 新エネWG時　質問事項回答

Q ： 測定範囲が0～50m/sの風向風速計をClass1A機種に取付ている理由

A ： 下記理由により当該風車に0～50m/sの風向風速計を採用していた（メーカー回答）

① 当該風車はIEC61400-1 ed.2に準拠しており、風車自体がヨーイング停止状態で、どの方向からの風に対しても、50m/s（10分平均）、70m/s（3秒ガスト）に耐えられる設計となっており、認証を受けています。（メーカー回答）

※ 前回お伝えした、ヨーイング機能停止時の90度方向からの風に対しては45m/s（10分平均）までしか耐えられないという情報（下記計算式含む）については誤った情報でした。

~~ヨーイング機能を失った状態での耐風速 ⇒ 45m/s（10min.ave）~~
~~計算式 ⇒ Sqrt（1.1/1.35）×50m/s ＝ 45m/s（10min.ave）~~

② 50m/s（10分平均）、70m/s（3秒ガスト）に耐えられる設計であることを担保するために実働風車でそれら風速上限値まで計測できる風速計を取付けることはせず、当該IECの認証に依存していました。（メーカー回答）

③ 現行機種では、耐風速が57m/sとなっている4MW機で75m/sが計測上限の風向風速計が標準装備されていますが、耐風速が50m/sである3MW機では、計測上限が50m/sの風速計が標準となっています。（メーカー回答）

# 前回の報告内容との比較

前回の審議の際は、風向風速計のエラー以前にナセル方向追従動作の差異が発生した点を、クラッチ板の異常によるものと考えていたが、その後に行ったシミュレーションや分析の結果から、ヨーイングの異常が原因であると判断し、その起点となる原因を号機別に掘り下げを行った。

## 前回の報告内容

① 風向の変化にナセルが追従しようとする

↓

② ヨーウォームギアクラッチ板の破損によりヨーイングに異常が発生

↓

③ 風向風速計のエラー発生

↓

④ 横方向、または後方からの強風によりブレードが破損

## 今回の報告内容

ブレード破損の原因は、いずれも**ヨーイングの異常が発生**したことである。

ヨーイングに異常が生じた原因については、号機別に以下の通りである。

8号機、13号機 ： 風向風速計のエラーにより風向とナセル向きに差異が生じ、強風を受けクラッチ板が破損した。クラッチ板はメーカー指定である1年毎の点検が行われていなかった。

16号機 ： 点検時に規定を超えるトルク値でのクラッチ板の締付け調整を行った。

7号機 ： 強風が予想される状況下でのローターロック・ブレーキを使用。

# 事故原因究明・再発防止対策検討フロー

**1. 風車挙動の確認**

事故発生時の風車運転データを整理

**2. 破損部品の確認**

破損部品の調査
ヨーウォームギアクラッチ板SEM観察

**3. 風車設計の確認**

事故発生時の風車運転データを整理

**4. 最大風速の推定**

台風通過時の最大風速を推定

**5. 極値風速の解析**

MASCOTによる台風シミュレーションを行い風車設置場所での極値風速の確認

**6. 荷重シミュレーション解析**

MASCOTでの解析結果から、各部位の荷重シミュレーションを実施し、設計荷重超過の有無を確認

**7. 推定原因**

8号機、13号機の原因

**8. 推定原因**

16号機の原因

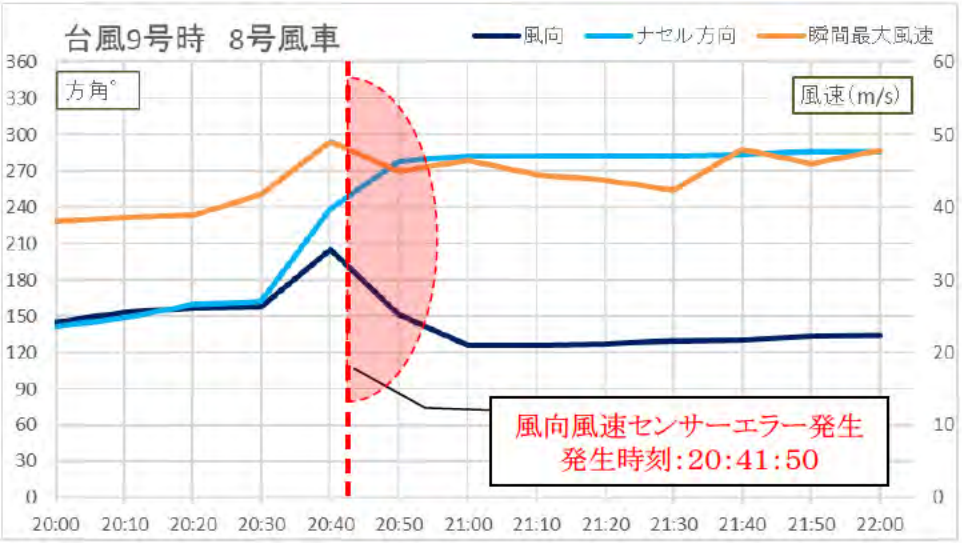
**9. 推定原因**

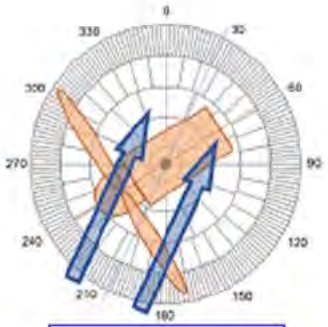
7号機の原因

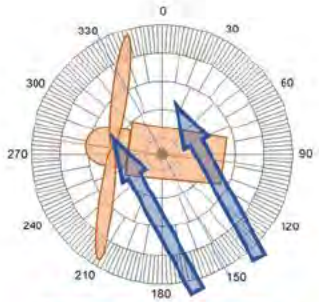
**10. 再発防止対策**

事故原因についての再発防止策の検討

# 事故発生時風車挙動 （8号機）




8号風車

20:30 時点　ナセル方向:162.0°　風向:158.2°　差異:  3.8°
20:40 時点　ナセル方向:238.9°　風向:205.2°　差異: 33.7°

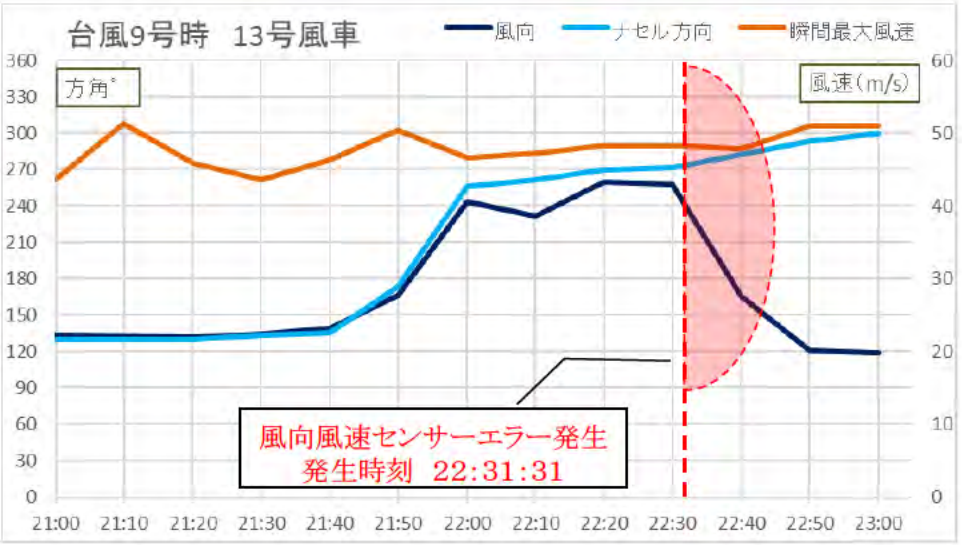
20:41:50　Error on all wind sensors　センサーエラー発生

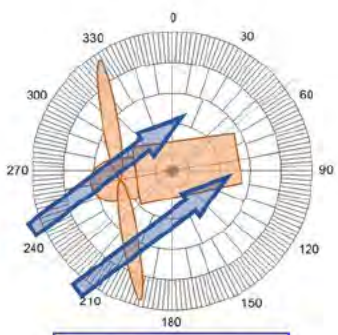
20:50 時点　ナセル方向:277.8°　風向:151.2°　差異: 126.6°

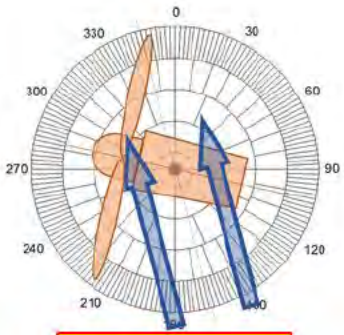
20:40 時点での、差異:33.7° については、突風により、一時的に風向とナセル角に差異が生じたものと考えられ、トルクリミッタ（クラッチ板）の動作としては正常と考える。

20:41:51 時点で発生した風向風速計のエラーと、20:50 時点での差異が拡大していることから、エラー停止中、及びエラー復帰後も、ナセルが押され、ヨーイングの異常状態（クラッチ板の破損）が生じ、風向変化に対し、ナセルの追従が不可能となったものと考える。

# 事故発生時風車挙動 （13号機）




13号風車

22:00 時点　ナセル方向：256.1°　風向：243.2°　差異：12.9°
22:10 時点　ナセル方向：261.3°　風向：232.1°　差異：29.2°

22:31:31　Error on all wind sensors　センサーエラー発生

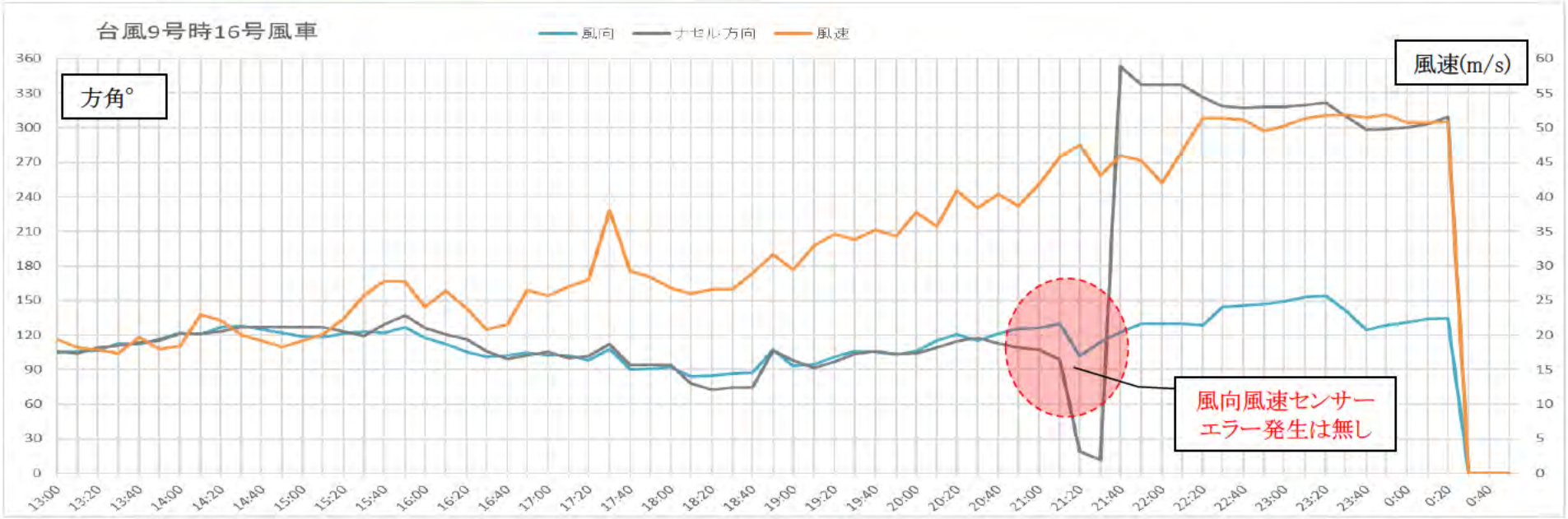
22:40 時点　ナセル方向：282.4°　風向：165.3°　差異：117.1°

22:10 時点での、差異：29.2°　については、突風により、一時的に風向とナセル角に差異が生じたものと考えられ、トルクリミッタ（クラッチ板）の動作としては正常と考える。

22:31:31 時点で発生した風向風速計のエラーと、22:40 時点での差異が拡大していることから、エラー停止中、及びエラー復帰後も、ナセルが押され、ヨーイングの異常状態（クラッチ板の破損）が生じ、風向変化に対し、ナセルの追従が不可能となったものと考える。

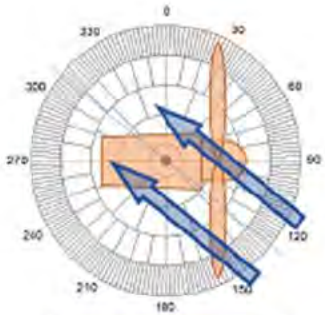
前頁の8号機、及び上記13号機のヨー追従動作と風向風速計のエラー発生の状況より、当該2機の事故発生について、前回の審議時では、風向風速計のエラー発生は事故原因の可能性としては低いと考えていたが、風向変化に対するヨーイングの異常については風速計のエラー発生が起因であると判断した。

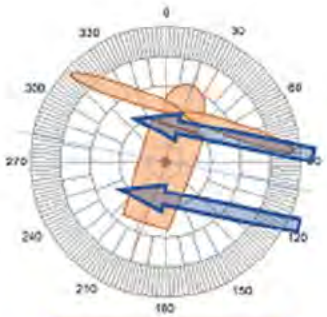
# 事故発生時風車挙動 （16号機）



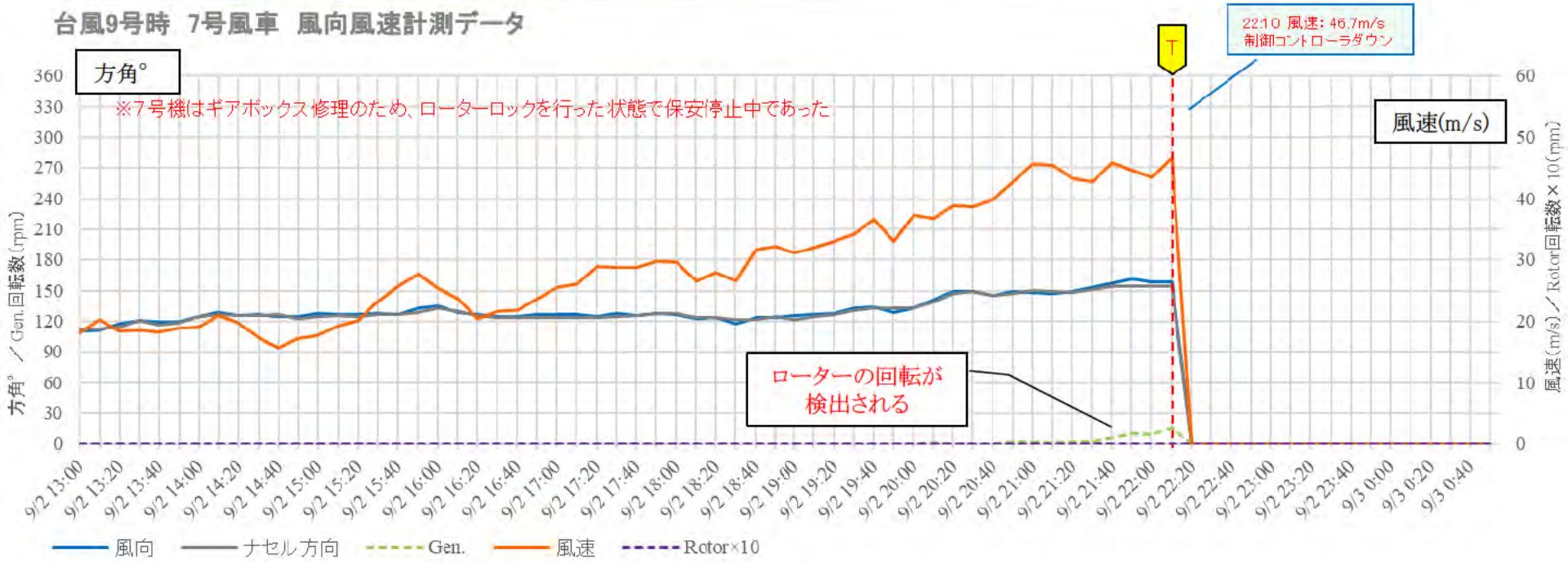

16号風車では、風向風速計のエラーが発生していない状況でナセル追従動作に差異が発生。

16号機については8号機、13号機と異なり、風向風速計のエラーは発生していないが、風速45m/sを超える赤網掛部分で、強風に押されナセル方向が急変したことで、規定値以上のトルク値での締付けを行ったヨーウォームギアクラッチ板にダメージを受け、以降のナセル追従動作に支障をきたす要因となったと考える。



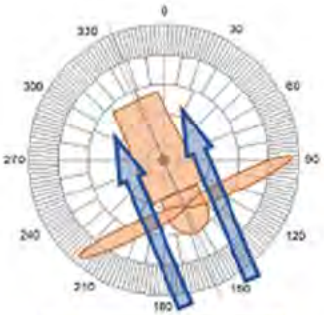
# 事故発生時風車挙動 （7号機）



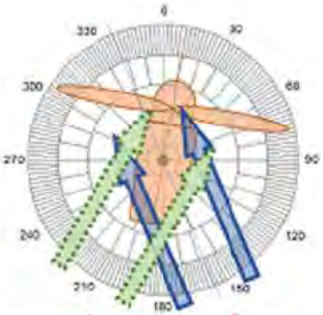

7号機については台風9号通過後の確認ではブレードの破損は無かったが、台風9号通過時に発生した故障により、制御コントローラがダウンし、ヨーイングができない状態となった。

制御コントローラがダウンするまでのヨーイングに異常は無かったが、台風通過後はナセルが約150° 近く押された状態となっており、ヨーウォームギアが破損していた。

7号機は、ギアボックス故障のため、ローターロック・ブレーキを使用して保安停止していたが、20時50分頃から発電機の回転が検出されたことより、このときローターロックピンが破損したものと推測される。



22:10 46.7m/s
風 向 ： 157.8°
ナセル ： 154.4°



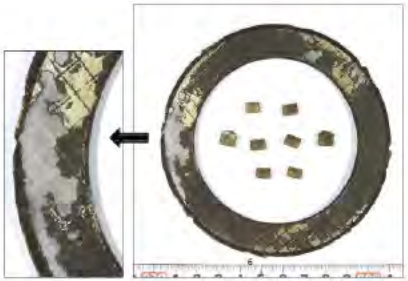
台風通過後のナセル方向
ナセル ： 10～15°
風向は南東から南西に変化

# 破損部品の確認

専門調査会社の報告書より、クラッチ板代表破面の破壊形態の確認から、**延性破壊** であることが確認された。摺動面のキズの状態より、**摩擦によるクラッチ板同士の固着、または動性鈍化**が考えられる。

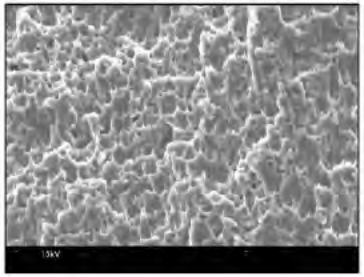
歯の破断は鋼材の降伏点を超える外部応力が作用したものと考えられる。

破面に強固な付着物が形成されており、高い温度での油脂分との接触が考えられ、クラッチ板同士の過度な摩擦があったことから、クラッチ板同士の固着、または動性鈍化があったと考えられる。



破損したクラッチ板

クラッチ板破断面



SEMによる破面拡大図

ピッチシリンダの破損について、台風9号通過時に破損したブレードのピッチシリンダは全て故障していた。(ピッチシリンダが故障していないブレードは破損していなかった)

曲がったシリンダシャフト

接続部が折れたシリンダシャフト

ピッチシリンダの破損については、ヨーイングに異常が生じたことで、強風によりブレードにかかる荷重負荷がピッチシリンダシャフトの耐荷重を上回り、シャフトの曲がりや折れに至ったものと考えられる。

# 破損部品の確認

破損したピッチシリンダの本体部分やシリンダシャフトが、ハブ内のコントローラ盤に接続されている制御線を損傷させたことにより、風車コントローラが起動しない状態となった。（13号機、16号機）

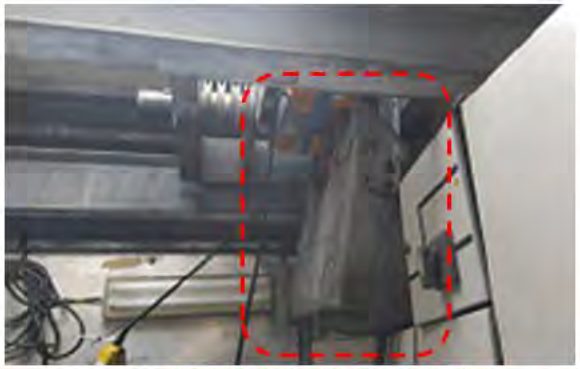
破損したピッチシリンダがハブ内の配線などを押しつぶしていた

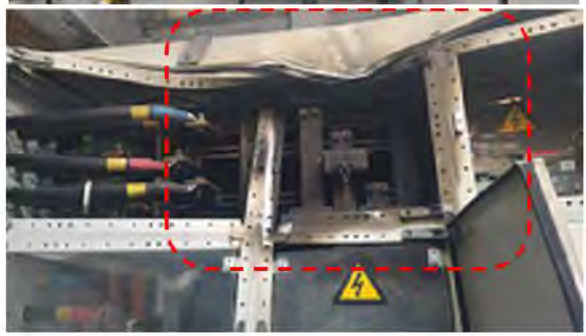
7号機では、ギアボックス故障のため、ローターが回転しないようにローターロック・ブレーキをかけていたが、ローターロックピンの破損によりローターが回転したことでブレーキが過熱し、ブレーキ部周辺に配線されていた制御線を損傷させ、風車コントローラが起動しない状態となった。

上向きに折れ曲がった
ローターロックピン

ブレーキ周辺

ブレーキ過熱により損傷した制御線





ナセル内ホイストクレーンのチェーンボックスが制御盤に衝突し、盤内で短絡が発生

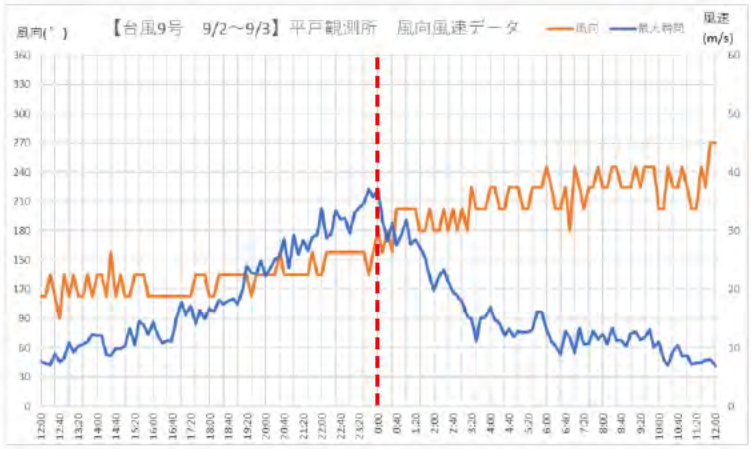
8号機では、ナセル内ホイストクレーンのチェーンボックスが、ブレード破損の際にタワーが揺れたことにより制御盤に衝突し、690V電源ラインと接触し短絡が発生したため制御電源断となり、風車コントローラが起動しない状態となった。

# 最大風速の推定

台風当日に実際に吹いたであろう風速について、的山大島風力発電所の南・約14kmにある、平戸特別気象観測所の測定データを用いて相関グラフを作成し、近似式と標準偏差±3σから、的山大島における台風通過時の最大瞬間風速の推定を行った。

平戸特別気象観測所について

所在 地　　：長崎県平戸市岩の上町
経度緯度　：北緯33度21．5分　東経129度33．0分
海面上高さ　　：58m
風速計高さ　　：12．4m




台風9号時
　最大瞬間風速　：　37．1m/s　（23:40、00:00頃）

台風10号時
　最大瞬間風速　：　42．8m/s　（03:50頃）

：赤破線は台風9号時は 0:00 、台風10号時は 04:00 を示す

# 最大風速の推定

台風9号時　事故機の風向風速データ

8号機

13号機

16号機

7号機

【参考】台風9号時　4号機、5号機　風向風速

台風9号通過時、事故機4機については通過時に発生した故障により、故障後の風向風速データが欠測したため、風向風速の変化の参考として、4号機、5号機の風向風速データを参考として用意した。

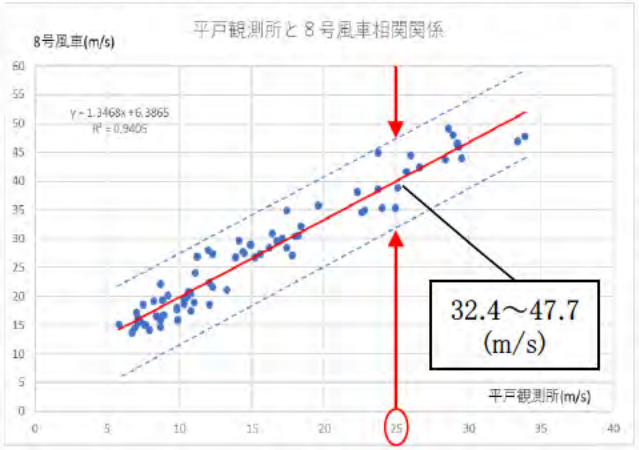
【参考】台風10号時　4号機、5号機　風向風速

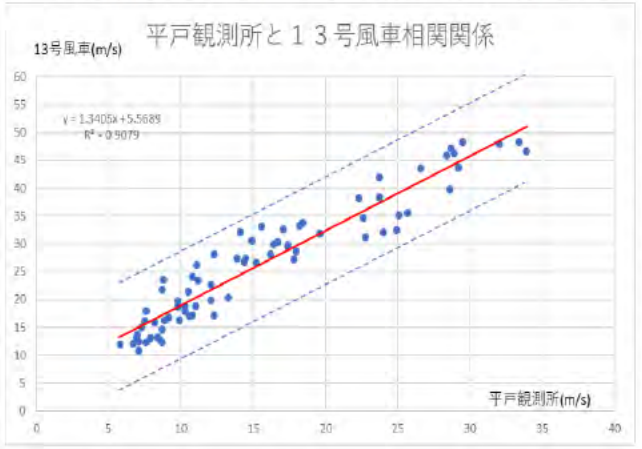
台風10号通過時、事故機である7号機について風車コントローラが起動せずSCADAデータが欠測しており、7号機に近い距離にある4号機、5号機の風向風速データを参考として用意した。

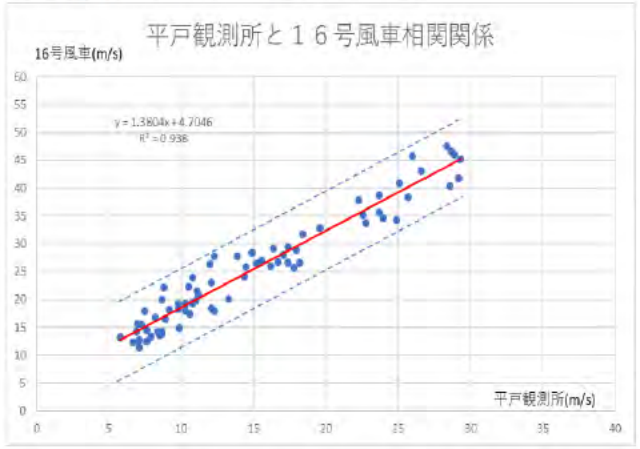
# 最大風速の推定

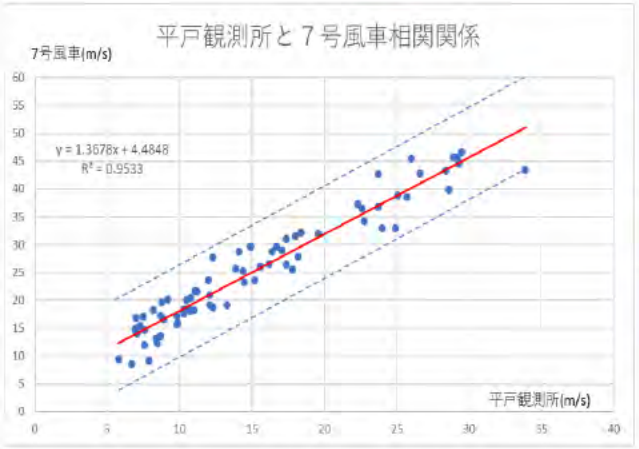
台風9号、台風10号での風速のピークの時間帯については的山大島の風車で計測された時間帯とほぼ一致している。

使用したデータは各事故機のナセル高（67．2m）での最大瞬間風速と、平戸特別気象観測所で記録されている最大瞬間風速とした。
ただし風速計の制限より、50m/s以上の風速データを除外し、9月2日10時から各事故機のデータ欠測までのデータとしている。




各号機と平戸特別気象台の最大瞬間風速の近似式（赤線）と標準偏差±3σ（青破線）より、台風通過時に推定される最大瞬間風速は以下となった。

| 風速（m/s） | 平戸観測所 | 8号 | 13号 | 16号 | 7号 |
|---|---|---|---|---|---|
| 台風9号 | 37.1 | 48.7～64.0 | 45.4～65.3 | 48.5～63.4 | 48.0～62.5 |
| 台風10号 | 42.8 | 56.4～71.7 | 53.0～72.9 | 56.3～71.3 | 55.8～70.3 |

上記相関データより、当日の風車SCADAで記録された風速データからの推測として、台風9号時は65m/s前後、台風10号時は70m/sを超える風速であったと考えられる。

8号機の場合、相関により求めた回帰式が y=1.3468x+6.3865 であり、この数値に標準偏差の3倍（±3σ）を加えた値が推定値となる。

例）平戸観測所の風速：x=25.0(m/s)の場合、標準偏差：σ=2.5474（3σ=7.6422）とすると、8号風車の最大風速の推定値：y は次の値となる。

y=1.3468x＋6.3865±3σ　=1.3468×25.0＋6.3865±7.6422 となり、このときの8号機の推定値は32.4～47.7(m/s) となる。

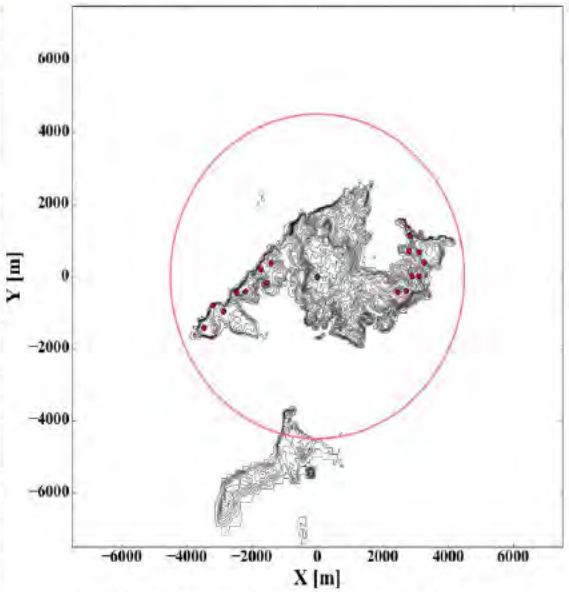
# 台風時の強風解析

## MASCOTによる台風シミュレーションについて

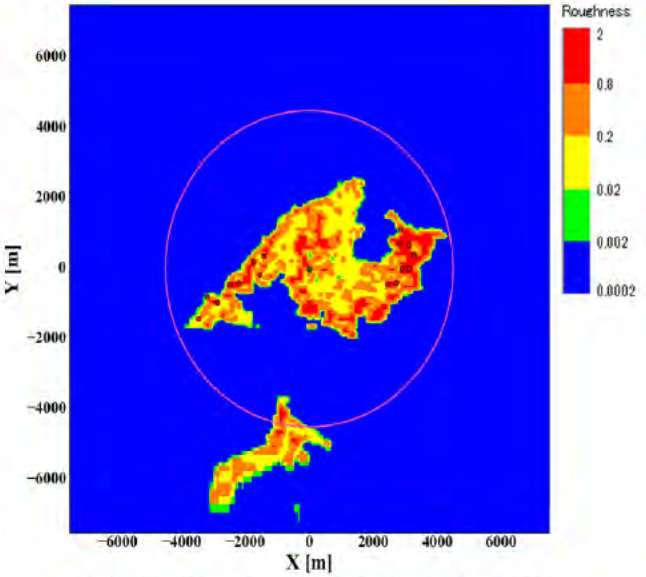
的山大島サイトにおける風況解析、極値風速算定のため、専門会社にMASCOTによる台風シミュレーションを依頼した。

・格子設定

| 項目 | 設定値 |
|---|---|
| 解析領域 | 15000m×15000m×10000m |
| 解析中心<br>（日本測地系） | N 33° 29′ 1.0″<br>E 129° 32′ 26.0″ |
| 地表面粗度区分 | II |
| 最小水平格子幅 | 25 m |
| 最大水平格子幅 | 250 m |
| 最小格子領域 | 4500 |
| 水平格子拡大率 | 1.1 |
| 最小垂直格子幅 | 5 m |
| 垂直格子拡大率 | 1.2 |
| 付加領域比率 | 1.0 |
| 標高データ | 10mメッシュ（基盤地図情報） |
| 地表面粗度データ | 100mメッシュ（MASCOT附属） |



等高線図（MASCOTの出力ファイルより作成）



地表面粗度（MASCOTの出力ファイルより作成）

## 台風シミュレーションについて

的山大島サイトは、平成12年建設省告示第1454号において定められている地表面粗度区分はⅡとなっており、建設時の建築確認申請も特定行政庁が規定で定める区域以外は海岸を含め地表面粗度区分はⅡとされているため、各種計算については粗度区分Ⅱを用いております。

事故機風車設置場所における実際の地形に応じて判断した場合、風車位置は海岸から一定距離離れており、地形についても樹木や森林等が多く平坦な地形ではないため、粗度区分についてはⅡ相当であると考えられることより、シミュレーションについても粗度区分Ⅱをベースに実施した。

# 台風時の強風解析

MASCOTによる台風シミュレーションによる極値風速算出結果

| 風車 | 極値風速 | | 基本情報 | | | | 各極値風速の算定に用いた係数 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | $U_h$ | | | $U_{e50}$ | | | |
| | $U_h$ [m/s] | $U_{e50}$ [m/s] | 粗度区分 | $V_0$ [m/s] | ハブ高 [m] | $\theta_d$ [°] | $E'_{tV}$ | $E_{tV}$ | $E_{pV}$ | $E_{tl}$ | $I_p$ | $I_{h1}$ | $G_f$ |
| No.1 | 45.1 | 67.1 | II | 34 | 67.2 | 39.4 | 0.952 | 1.000 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.2 | 45.1 | 67.1 | II | 34 | 67.2 | 118.1 | 0.998 | 1.000 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.3 | 46.4 | 69.7 | II | 34 | 67.2 | 163.1 | 1.028 | 1.028 | 1.327 | 1.034 | 0.139 | 0.144 | 1.503 |
| No.4 | 46.7 | 69.4 | II | 34 | 67.2 | 129.4 | 1.035 | 1.035 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.5 | 45.5 | 68.1 | II | 34 | 67.2 | 129.4 | 1.009 | 1.009 | 1.327 | 1.018 | 0.139 | 0.142 | 1.495 |
| No.6 | 45.1 | 67.1 | II | 34 | 67.2 | 320.6 | 0.930 | 1.000 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.7 | 49.6 | 78.0 | II | 34 | 67.2 | 163.1 | 1.099 | 1.099 | 1.327 | 1.179 | 0.139 | 0.164 | 1.574 |
| No.8 | 48.6 | 75.4 | II | 34 | 67.2 | 151.9 | 1.078 | 1.078 | 1.327 | 1.133 | 0.139 | 0.157 | 1.551 |
| No.9 | 45.1 | 67.1 | II | 34 | 67.2 | 331.9 | 0.976 | 1.000 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.10 | 45.3 | 69.5 | II | 34 | 67.2 | 151.9 | 1.005 | 1.005 | 1.327 | 1.097 | 0.139 | 0.152 | 1.534 |
| No.11 | 46.6 | 69.7 | II | 34 | 67.2 | 174.4 | 1.032 | 1.032 | 1.327 | 1.021 | 0.139 | 0.142 | 1.497 |
| No.12 | 45.9 | 68.2 | II | 34 | 67.2 | 129.4 | 1.017 | 1.017 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.13 | 47.3 | 70.3 | II | 34 | 67.2 | 129.4 | 1.048 | 1.048 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.14 | 45.9 | 68.3 | II | 34 | 67.2 | 118.1 | 1.018 | 1.018 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.15 | 46.7 | 69.4 | II | 34 | 67.2 | 118.1 | 1.035 | 1.035 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |
| No.16 | 47.0 | 69.9 | II | 34 | 67.2 | 118.1 | 1.042 | 1.042 | 1.327 | 1.000 | 0.139 | 0.139 | 1.487 |

ブレード破損に至った4機は極値風速が高いものから上位4機であった。

10分平均風速:Uh についてはいずれも50m/s以下であるが、3秒平均風速:Ue50 については上位3機が70m/sを超える結果となった。

この極値風速を含む他のMASCOTのシミュレーション結果をもとに、ベスタス社に当該風車設備の荷重耐力等のシミュレーション解析を依頼した。

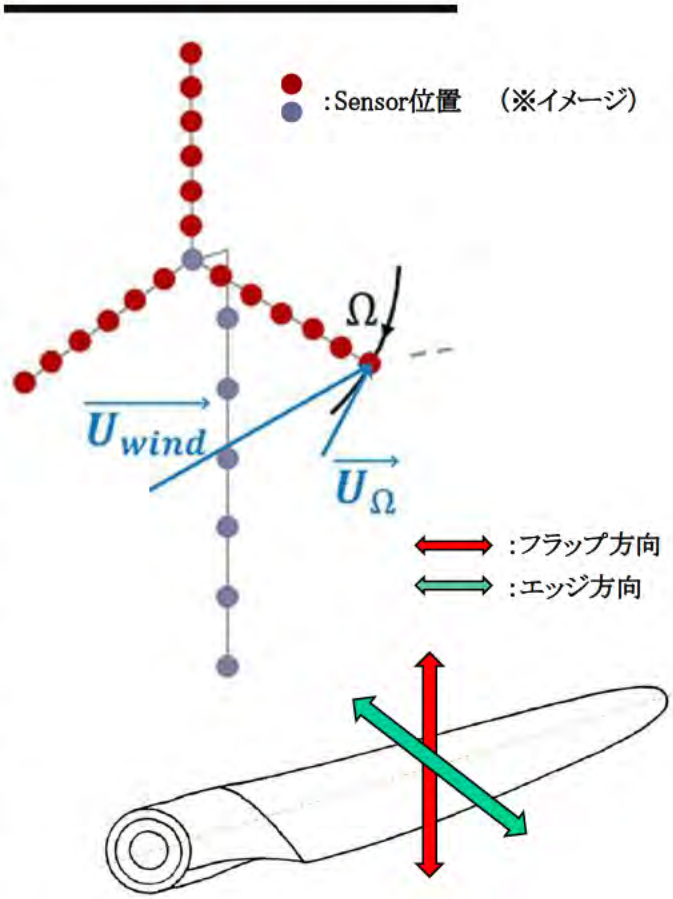
# 風車設備の荷重シミュレーション算出結果 （ブレードの荷重）

表1:ブレードフラップ方向荷重(抜粋)

| Sensor | Unit | Method | [Design] | WTG 7 | WTG 8 | WTG 13 | WTG 16 | Max [WTG 7,8,13&16] | Max [All Other WTGs] | Ratio [WTG 7,8,13&16] | Ratio [All Other WTGs] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B?Mx00100 | [kNm] | Max | 5660.00 | 6093.16 | 5583.21 | 4966.53 | 5250.40 | 6093.16 | 4969.84 | 1.08 | 0.88 |
| B?Mx00500 | [kNm] | Max | 4674.70 | 4964.32 | 4599.17 | 4094.03 | 4323.15 | 4964.32 | 4130.23 | 1.06 | 0.88 |
| B?Mx01000 | [kNm] | Max | 3249.45 | 3539.22 | 3234.07 | 2877.96 | 3074.02 | 3539.22 | 2936.91 | 1.09 | 0.90 |
| B?Mx01500 | [kNm] | Max | 2084.58 | 2314.22 | 2086.49 | 1849.85 | 2000.58 | 2314.22 | 1906.31 | 1.11 | 0.91 |
| B?Mx02000 | [kNm] | Max | 1185.72 | 1345.34 | 1201.08 | 1067.89 | 1155.25 | 1345.34 | 1108.76 | 1.13 | 0.94 |
| B?Mx02500 | [kNm] | Max | 610.11 | 698.95 | 618.12 | 553.51 | 598.97 | 698.95 | 572.51 | 1.15 | 0.94 |
| B?Mx03000 | [kNm] | Max | 245.95 | 286.90 | 255.32 | 226.54 | 245.27 | 286.90 | 232.17 | 1.17 | 0.94 |
| B?Mx03500 | [kNm] | Max | 57.96 | 68.41 | 61.28 | 53.44 | 57.46 | 68.41 | 54.54 | 1.18 | 0.94 |
| B?Mx00100 | [kNm] | Min | -5529.00 | -6166.46 | -5621.00 | -5006.41 | -4892.04 | -6166.46 | -4840.50 | 1.12 | 0.88 |
| B?Mx00500 | [kNm] | Min | -3791.92 | -4500.28 | -4136.89 | -3649.40 | -3577.40 | -4500.28 | -3525.40 | 1.19 | 0.93 |
| B?Mx01000 | [kNm] | Min | -2625.26 | -3098.92 | -2858.67 | -2511.27 | -2466.12 | -3098.92 | -2411.36 | 1.18 | 0.92 |
| B?Mx01500 | [kNm] | Min | -1698.87 | -1990.14 | -1850.29 | -1622.15 | -1596.13 | -1990.14 | -1551.76 | 1.17 | 0.91 |
| B?Mx02000 | [kNm] | Min | -1056.98 | -1143.48 | -1077.19 | -941.68 | -926.41 | -1143.48 | -894.32 | 1.08 | 0.85 |
| B?Mx02500 | [kNm] | Min | -593.06 | -582.33 | -556.52 | -483.26 | -475.28 | -582.33 | -456.31 | 0.98 | 0.77 |
| B?Mx03000 | [kNm] | Min | -253.47 | -234.24 | -225.56 | -194.30 | -191.44 | -234.24 | -182.27 | 0.92 | 0.72 |
| B?Mx03500 | [kNm] | Min | -61.51 | -56.58 | -52.91 | -45.20 | -44.57 | -56.58 | -43.94 | 0.92 | 0.71 |

表2:ブレードエッジ方向荷重(抜粋)

| Sensor | Unit | Method | [Design] | WTG 7 | WTG 8 | WTG 13 | WTG 16 | Max [WTG 7,8,13&16] | Max [All Other WTGs] | Ratio [WTG 7,8,13&16] | Ratio [All Other WTGs] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B?My00100 | [kNm] | Max | 2528.00 | 2475.57 | 2133.36 | 1939.37 | 1922.03 | 2475.57 | 1916.39 | 0.98 | 0.76 |
| B?My00500 | [kNm] | Max | 2081.40 | 2276.97 | 2064.68 | 1761.01 | 1739.07 | 2276.97 | 1737.08 | 1.09 | 0.83 |
| B?My01000 | [kNm] | Max | 1536.00 | 1440.19 | 1305.76 | 1117.36 | 1094.10 | 1440.19 | 1095.61 | 0.94 | 0.71 |
| B?My01500 | [kNm] | Max | 956.00 | 835.97 | 755.43 | 645.99 | 634.24 | 835.97 | 629.60 | 0.87 | 0.66 |
| B?My02000 | [kNm] | Max | 519.00 | 444.69 | 403.84 | 345.66 | 338.34 | 444.69 | 333.73 | 0.86 | 0.64 |




設計荷重の超過が即破損につながる結果となるとは限らないが、MASCOTでの極値風速が高い7号機、8号機では、シミュレーションにより算出されたブレードのフラップ方向に対する荷重が、[Design]:(設計荷重) に対して上回る数値(Ratioが1.0以上)となっている。また、7号機ではエッジ方向で、翼根部に近い位置で一部設計荷重の超過となった。

13、16号機を含む14機のブレードへの荷重については設計荷重の範囲内であることが確認できた。

# 風車設備の荷重シミュレーション算出結果 （ピッチシリンダの荷重）

表3：ピッチシリンダ最大荷重（抜粋）

| Sensor | Unit | Method | [Design] | WTG 7 | WTG 8 | WTG 13 | WTG 16 | Max [WTG 7,8,13&16] | Max [All Other WTGs] | Ratio [WTG 7,8,13&16] | Ratio [All Other WTGs] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fpi?1 | [kN] | Min | -511.00 | -727.49 | -669.24 | -590.12 | -582.29 | -727.49 | -571.60 | 1.42 | 1.12 |
| Fpi?1 | [kN] | Max | 537.00 | 838.57 | 733.05 | 638.98 | 628.70 | 838.57 | 608.48 | 1.56 | 1.13 |
| | | | | | | | | | | | |
| Fpi?1 | [kN] | Min | - | 62E50b1 5000(fam | 62E50b1 5000(fam | 62E50b1 5000(fam | 62E50b1 5000(fam | 62E50b15 000(fam | 62E50a1 5000(fam | | |
| Fpi?1 | [kN] | Max | - | 62E50a0 4500(fam | 62E50a0 4500(fam | 62E50a0 4500(fam | 62E50a0 4500(fam | 62E50a04 500(fam | 62E50a0 4500(fam | | |

Table 6-2 Extreme Pitch Cylinder Force incl. PLF (Excl. Pitch Lock LCs).

表4：正対時のピッチシリンダ荷重（抜粋）

| Sensor | Method | Ratio [WTG7] | Ratio [WTG8] | Ratio [WTG13] | Ratio [WTG16] |
|---|---|---|---|---|---|
| Fpi?1 | Min | 0.75 | 0.69 | 0.59 | 0.62 |
| Fpi?1 | Max | 0.56 | 0.51 | 0.36 | 0.35 |

台風時の負荷により曲がった
ピッチシリンダシャフト

ピッチシリンダの荷重について、ナセルが風向に対して正対しない状態では、ブレード破損に至らなかった12機においても、3～13%程度、[Design]：（設計荷重）に対して上回る数値（Ratioが1.0以上）となったが、表4の通り風車のヨー制御が正常に働き、風向に対しナセルが正対する状態であれば設計荷重を下回り、ピッチシリンダが破損せずにブレードをフェザリング状態に維持できることがわかった。

台風9号通過後に行った点検により、事故機3機については、破損したブレードのピッチシリンダが全て破損していた。ブレード破損の無い箇所のピッチシリンダに破損は無かったことより、ヨーイング機能が正常な状態を保ち、風向に対しナセルが正対する状態であれば、ピッチシリンダが破損せずブレードも破損に至らないものと考えられる。

# 風車設備の荷重シミュレーション算出結果まとめ

ベスタス社による風車設備の荷重シミュレーション算出結果より

MASCOT台風シミュレーション結果をもとに、ベスタス社での風車荷重シミュレーション解析を行った結果、ブレードの荷重について、7号機、8号機で設計荷重を超過、また、ピッチシリンダの荷重については、ヨーイングが正常に機能しない条件下において設計荷重を超過する結果となった。

設計荷重超過の要因としては、IECの規格では、暴風時の乱流強度：Ih1=0.11、ウィンドシア：α=0.11であり、これが設計上の数値となるが、MASCOTのシミュレーション結果にある地形を考慮した乱流強度やウィンドシアの数値は、どちらもこの0.11という数値を上回っているため、この数値が影響することで、風速70m/sを超えない状況での荷重が設計荷重を超えるというシミュレーション結果となった。

平戸観測所との相関データからは設計風速を超えてはいないと考えられるが、今回のブレード破損に至る経緯としては、荷重シミュレーションにおいて設計荷重超過が無かった13号機、16号機のブレードが破損したこともあり、設計風速に満たない状態で破損が生じる原因として、**ヨーイングの異常**によりピッチシリンダの破損やクラッチ板破損などが同時に起こったことで生じたと考えられる。

# 事故原因の推定 （8号機、13号機）

風向風速計
エラー発生
前後60秒間
ヨーイング停止

→

60秒間の
ヨーイング
停止中に
風向が
更に変化

→

ヨーイング
復帰するも
ナセルが
風向に追従
できなくなる
**(クラッチ板破損)**

→

ヨーイング異常
状態となり
ピッチシリンダ
破損
フェザリング
維持できず

→

台風による
横、後方から
強風を受風し
ブレード破損

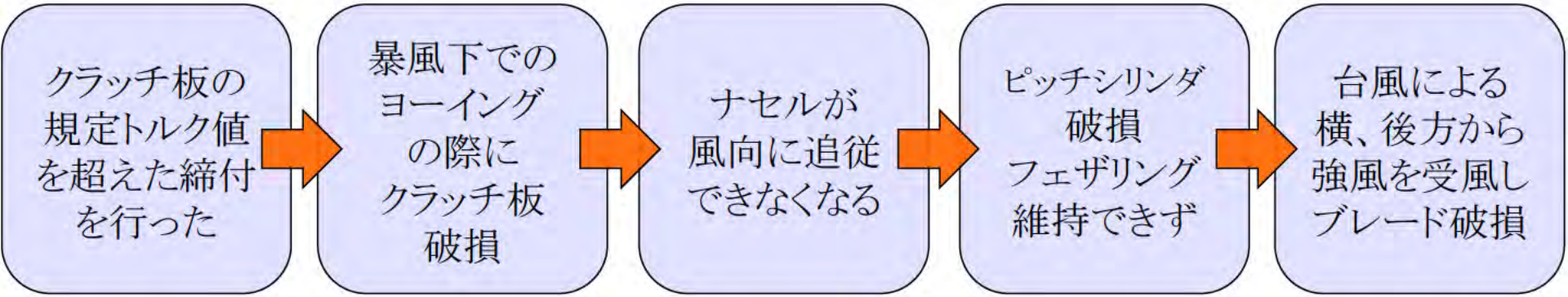
## 8号機、13号機の事故原因について

この2機について、ヨーイング機能に異常を生じさせた原因として、計測範囲を超えた風速による、風向風速計のエラー発生が挙げられる。

風向風速計のエラーにより、風向とナセル方向の差異が拡大し、その状態で瞬間的に強い力が加わったことでクラッチ板が破損したものと推測する。クラッチ板については、前年度の1年点検実施から1年以上点検が行われておらず、メーカーが指定する1年毎の定期点検が適切に実施されていない状態であった。

ヨーイングに異常を生じさせた原因は、計測範囲を超えた風速によるエラーの発生、点検が適切に行われていないために生じたクラッチ板の破損であったと推測する。

# 事故原因の推定 （16号機）




## 16号機の事故原因について

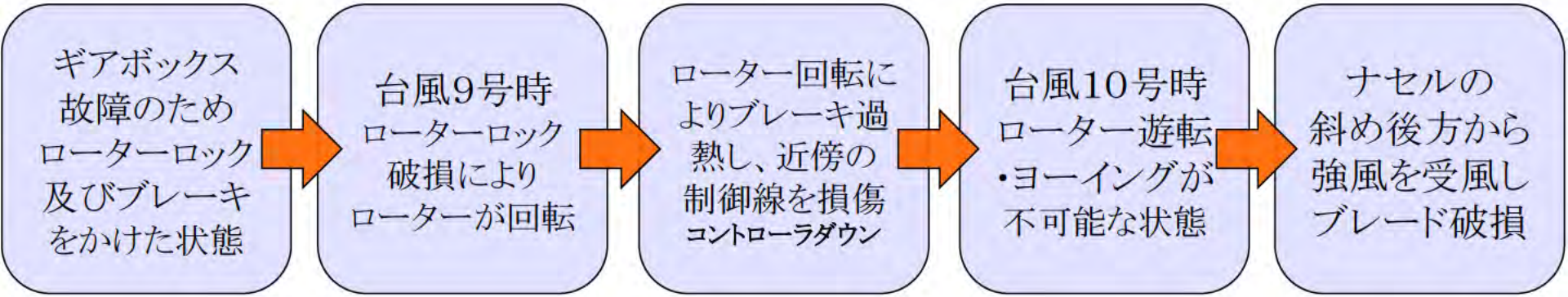
16号機については、2020年8月の点検時にヨーイングの滑りが見られたため、滑りを一時的に解消するために規定トルク値を超えた値での締付調整を行ったことが担当所員への聞き取りにより分かった。

締付け過多によるクラッチ板同士の滑り機能が低下した状態でクラッチ板の歯に台風による強い力が加わり破損した。

このことによりヨーイングができなくなり、風向に対し正対しない状態で強い横風を受けピッチシリンダが破損し、フェザリング状態を維持できずブレードが破損した。

ヨーイングに異常を生じさせた原因は、点検時に行った 規定値を超える値での締付調整 であったと推測する。

# 事故原因の推定 （7号機）




## 7号機の事故原因について

7号機はギアボックス故障による保安停止中に、台風9号通過時の強風でローターロックピンが破損した。
ローターロックピンの破損によりローターが回転したことでブレーキが過熱し、ブレーキ近傍を通っていた風車制御配線を損傷させ、風車コントローラがダウンした。

折れ曲がったローターロックピンが噛み込み、ローター遊転ができない状態となったことに加え、風車コントローラダウンによりヨーイングができない状態で台風10号を迎え、ナセル斜め後方からの強風を受け、ブレードが破損した。

ギアボックス故障とはいえ、台風による強風が予測可能な状況でローターロック・ブレーキをかけていたことによる運用方法が原因となり、ブレードが破損した。

# 事故原因分析

判定　○：可能性なし　×：可能性大

| 事象 | 要因 | | 確認・調査項目 | 確認・調査結果 | 判定 |
|---|---|---|---|---|---|
| ブレード破損 | 設計 | 設計風速 | 設計風速を確認（建築申請：34m/s－長崎県平戸市） | IEC Class1A（50m/s 10min.ave）　IEC 61400-1 ed.2(1999)機種を選定 | ○ |
| | 製造 | 製造不良 | 出荷前のブレードバランステスト報告書を確認 | 特に問題なし | ○ |
| | 環境 | 落雷 | 台風接近時の落雷の有無を調査 | 特に問題なし（台風接近前から通過後の期間に落雷は観測されず） | ○ |
| | | 風況異常 | 設計耐風速を上回る風速だったか調査 | 設計耐風速は超えていないと考えられる | ○ |
| | | 飛来物衝突 | ブレードへの飛来物衝突の痕跡確認 | ブレードやタワーへの外部からの飛来物衝突の痕跡ははし | ○ |
| | 制御 | 風車停止 | 風速25m/sを超えた時点で風車は停止状態か | 風車は全機停止していた （自動カットアウトにより全機Pause停止状態） | ○ |
| | | ヨー制御 | ヨー制御に問題はなかったか | 健全機：ヨー制御に異常はなく、風向に対しナセルは追従していた | ○ |
| | | | | **事故機：台風の強風による風向変化等で、ナセル追従に異常が生じた** | × |
| | | ピッチ制御 | ブレードピッチ制御に問題はなかったか | 健全機：ピッチ角はフェザリング状態であり、ピッチシステムに異常なし | ○ |
| | | | | **事故機：ピッチはフェザリング状態だったが強風を受けピッチシリンダが破損した** | × |
| | | エラー履歴 | 台風通過時のエラー履歴を確認 | 健全機：台風通過時に。ヨー制御を妨げるエラー発生はなし | ○ |
| | | | | **事故機：台風通過時に風向風速計のエラーが発生した（8号機、13号機）** | × |
| | 点検 | ブレード | 直近、および過去の点検記録内容を確認 | 定期点検、月次点検、日常点検の記録・内容を確認したが、ブレード破損に至る異常はなし | ○ |
| | | ピッチシステム | | 定期点検、月次点検、日常点検の記録・内容を確認したが、ブレード破損に至る異常はなし | ○ |
| | | ヨーシステム | | **ヨーシステムについては、今年度の1年点検は未着手であった（前回点検より1年以上経過）16号機に関しては、2020年8月の月次点検時にナセルの滑りが見られたため、部品入荷までの暫定措置として規定値を上回るトルク値で締付けを行っていた** | × |
| | 補修 | ブレード | 直近、および過去の補修記録内容を確認 | ブレード補修については、年間4～5機の計画的な定期補修を実施。日常点検等で発見された異常については直ちに風車を保安停止させ、臨時補修を実施している。 | ○ |
| | | ピッチシステム | | ピッチシステムの故障や異常の際は風車を直ちに保安停止させ、部品交換・修理等の補修作業を行い、健全性を確認している | ○ |
| | | ヨーシステム | | **2020年8月の月次点検時に発見された16号機ヨーシステムの異常の際に、交換部品が無かったため、規定値を上回るトルク値でクラッチ板の締付け調整を行った** | × |
| | 運用 | 予備部品 | 在庫数量、部品納期・リードタイムを確認 | **ヨーウォームギアクラッチ板の在庫補充を怠っていた** | × |
| | | ローターロック | 風車運転管理マニュアルを確認 | **強風時にローターロック・ブレーキを使用していた（7号機）** | × |

# 事故原因まとめ

事故の原因をまとめると、事故に至る過程は各号機により異るが、共通している点として
ヨーイング機能に異常 が生じたことだと考えられる。

## 8号風車

| | |
|---|---|
| 1 | 風向風速計エラー発生によるヨーイング停止 |
| 2 | ヨーイング停止中に風向の急激な変化 |
| 3 | ヨーイング機能に異常発生（クラッチ板破損） |
| 4 | 横～後方からの強風によりピッチシリンダ破損 |
| 5 | フェザリング状態を維持できずブレード破損 |

【原因】
ヨーイング機能に異常が生じたこと

## 13号風車

| | |
|---|---|
| 1 | 風向風速計エラー発生によるヨーイング停止 |
| 2 | ヨーイング停止中に風向の急激な変化 |
| 3 | ヨーイング機能に異常発生（クラッチ板破損） |
| 4 | 横～後方からの強風によりピッチシリンダ破損 |
| 5 | フェザリング状態を維持できずブレード破損 |

【原因】
ヨーイング機能に異常が生じたこと

## 16号風車

| | |
|---|---|
| 1 | 点検時の調整で規定を超えた値での締付け実施 |
| 2 | 強風でナセルが押された際にクラッチ板破損 |
| 3 | ヨーイング機能に異常発生 |
| 4 | 横～後方からの強風によりピッチシリンダ破損 |
| 5 | フェザリング状態を維持できずブレード破損 |

【原因】
ヨーイング機能に異常が生じたこと

## 7号風車

| | |
|---|---|
| 1 | ギアボックス修理のためローターロック・ブレーキ状態 |
| 2 | 強風によりロックピン破損し、ローターが回転 |
| 3 | ローター回転によりブレーキ部周辺が破損 |
| 4 | ブレーキ部破損で制御系信号線損傷により<br>ヨーイング機能に異常発生（風車制御コントローラダウン） |
| 5 | ヨーイング機能を失った状態で台風10号通過 |
| 6 | 横～後方からの強風によりブレード破損 |

【原因】
ヨーイング機能に異常が生じたこと

# 再発防止対策

事故に至る過程は各号機により異なりますが、ブレードの破損については、ヨーイング機能に異常が生じたことが主原因であることから、強風下でもヨーイング機能を維持することが事故の再発を防ぐこととなるため、下記の対策を全号機に実施します。

**原因 ①　計測範囲を超えた風速による風速計エラー発生　（8号機、13号機）**
**対策　　耐風性の高い風向風速計への変更実施**

現状の計測範囲：0-50m/s の風向風速計を、0-75m/sの機種に変更する。
風速計エラー発生によるヨーイングの異常発生を防ぐため、耐風性の高い風向風速計への交換を行う。

**原因 ②　運用上の不備**

**原因(1)　交換用予備部品（ヨーウォームギアクラッチ板）在庫切れ、及び点検時の対応不備　（16号機）**
**対策(1)　交換用予備部品の適正在庫確保**

不具合発生時に速やかに補修を行えるよう、交換用予備部品の在庫確保拡充を図る。
具体的な在庫数量としては、部品在庫切れを回避するため、風車全機分の50%（8機分）相当のクラッチ板を島内倉庫に確保し、使用後は速やかに在庫の補充を行う。

**原因(2)　強風下でローターブレーキをかけていたことによる制御線破損　（7号機）**
**対策(2)　ギアボックス保護よりもローター遊転を優先させる**

ギアボックス不具合時の対応として、強風が予想される場合はギアボックス保護よりもローター遊転させる対応を発電所運転管理マニュアルに盛り込む。

**原因(3)　1年毎の風車定期点検時期の遅延（8号機、13号機）**
**対策(3)　1年毎のヨーウォームギアの点検を半年毎に変更する**

1年毎の風車定期点検時期がコロナ禍の影響により遅延し、メーカーの指定である1年毎のヨーウォームギアの点検が適切に行われていなかったため、点検頻度を台風シーズンに合わせ半年毎に変更し、ヨーウォームギアクラッチ板の適切な状態を維持する。

# 安全対策

**前頁2つの再発防止対策以外に、安全対策として、強風による一時的なクラッチ滑りなどで、ナセルが正対しない状態となった場合での設計荷重超過によるピッチシリンダ破損を防ぐ目的として、台風時のブレードピッチロックを実施します。**

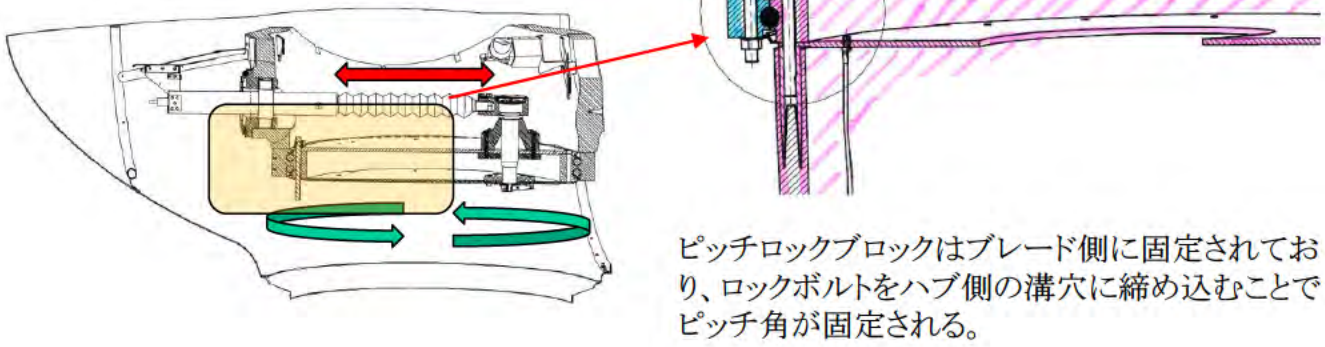
ロックボルト取付け基準として以下の2つの条件を定め、両条件を満たす場合とします。

① 台風の予報円の中に当発電所が入ると予想される進路となる場合

② 通過時の台風の強さが「非常に大きな」台風以上と予想される場合

（「非常に大きな」台風とは、気象庁では風速44m/s以上～54m/s未満とされています）

上記以外にも、台風の進行方向、速度、中心気圧や海面温度等により、風車に影響することが予想される台風の場合、東京本社技術部門も含め対応を個別検討し、電気主任技術者が最終判断を行います。




ピッチロックブロックはブレード側に固定されており、ロックボルトをハブ側の溝穴に締め込むことでピッチ角が固定される。

# 補足資料　風車設計時の風速

ハブ高さにおける10分平均の50年再現期待値$U_h$は、基準風速$V_0$に地形による平均風速の割増係数$E_{tV}$と高度補正係数$E_{pV}$を乗じたものとし、式（1.1）により求める。

$$\boldsymbol{U_h = E_{tV} E_{pV} V_0} \qquad (1.1)$$

平均風速の高度補正係数$E_{pV}$は式（1.2）により求める。

$$E_{pV} = 1.7\left(\frac{H_h}{Z_G}\right)^{\alpha} \quad Z_b < H_h \leq Z_G \qquad (1.2)$$

ここで$H_h$はハブ高さである67.2(m)、地表面粗度区分Ⅱにおける風速の鉛直分布パラメータ$Z_b$=5,$Z_G$=350,$\alpha$=0.15より式（1.2）に代入して求める。

$$E_{pV} = 1.7 \times \left(\frac{67.2}{350}\right)^{0.15} = 1.327$$

平均風速の割増係数$E_{tV}$=1、平均風速の高度補正係数$E_{pV}$=1.327、平戸市の基準風速$V_0$= 34 (m/s)を式（1.1）に代入して求める。

$$\underline{\boldsymbol{U_h = 1 \times 0.1327 \times 34 = 45.1\ (m/s)}}$$

次にハブ高さにおける3秒平均の50年再現期待値$U_{e50}$は、式（1.1）で求めた$U_h$を用いて式(1.3)により求める。

$$\boldsymbol{U_{e50} = G_f U_h} \qquad (1.3)$$

平坦地形状の乱流強度$I_p$は式(1.4)、極値風速時の乱流強度$I_{h1}$は式(1.5)、突風率$G_f$を式（1.6）により求めて式(1.3)に代入する。

$$I_p = 0.1\left(\frac{H_h}{Z_G}\right)^{-\alpha-0.05} \quad Z_b < H_h \leq Z_G \quad より \quad 0.1 \times \left(\frac{67.2}{350}\right)^{-0.15-0.05} = 0.1392 \qquad (1.4)$$

$$I_{h1} = E_{tl} I_p \quad より \quad 1 \times 0.1392 = 0.1392 \qquad (1.5)$$

$$G_f = 1 + 3.5 I_{h1} \quad より \quad 1 + 3.5 \times 0.1392 = 1.487 \qquad (1.6)$$

$$\underline{\boldsymbol{U_{e50} = 1.487 \times 45.1 = 67.06(m/s)}}$$

※参考資料：一般財団法人 日本海事協会　ウインドファーム認証に係る技術資料

# 補足資料　的山大島の地形について

**風車設置場所の地形については、**風車位置は海岸から一定距離離れており、地形についても樹木や森林等が多く平坦な地形ではない。

7号機、8号機周辺

13号機周辺

16号機周辺