

主な修正内容

1. P.8～P.9：原設計の設計審査内容を追加
 - ・ 設計的な瑕疵がないことや保有性能（各部材の余裕度）の確認
2. P.14：タワーの設計・製造・施工に瑕疵がないことを確認の追記
3. 静的解析に関する内容、断面照査における静的解析を削除
 - ・ 動的解析のみにより、現象を推定
 - ・ P.19：時刻歴応答解析は、 2σ の62.6m/s（10分平均）を用いた計算結果とした
 - ・ P.21：断面照査での基準強度は、メーカー提示の鋼板割付図とミルシートにおける降伏強度を採用
4. 倒壊の推定原因
5. 再発防止に、日立PSによる今後展開につながるよう「非常用電源の確保」を追加
6. 本書に記載されている「各風速のまとめ」を追加

日の岬ウインドパーク風力発電所の 倒壊事故について

2019年9月27日

アドエコロジー株式会社

目次

1. 風力発電所の概要
 2. 事故概要
 3. 事故原因の調査
 - (1) 設計および施工に係る審査
 - (2) 破損現物調査による品質確認
 4. 時刻歴解析による検証
 - (1) 台風モデルによる風況解析
 - (2) 解析条件
 - (3) 断面照査
 5. タワー倒壊の推定原因
 6. 再発防止について
- ※添付：補助資料 1～5

1. 風力発電所の概要

発電所名	日の岬ウィンドパーク風力発電所
所在地	和歌山県日高町大字阿尾字御野脇1990-18
運転開始日	2010年9月（8年稼働）
風車型式	エネルギー社 E-82 E1
製造メーカー	ENERCON社（ドイツ）
定格出力	1,990 kW
ハブ高	78m
ロータ直径	82m
風車耐風速規格	IEC/クラスII A
V _{e50} （3秒間平均）	59.5m/s
V _{ref} （10分間平均基準風速）	42.5m/s
乱流強度	A

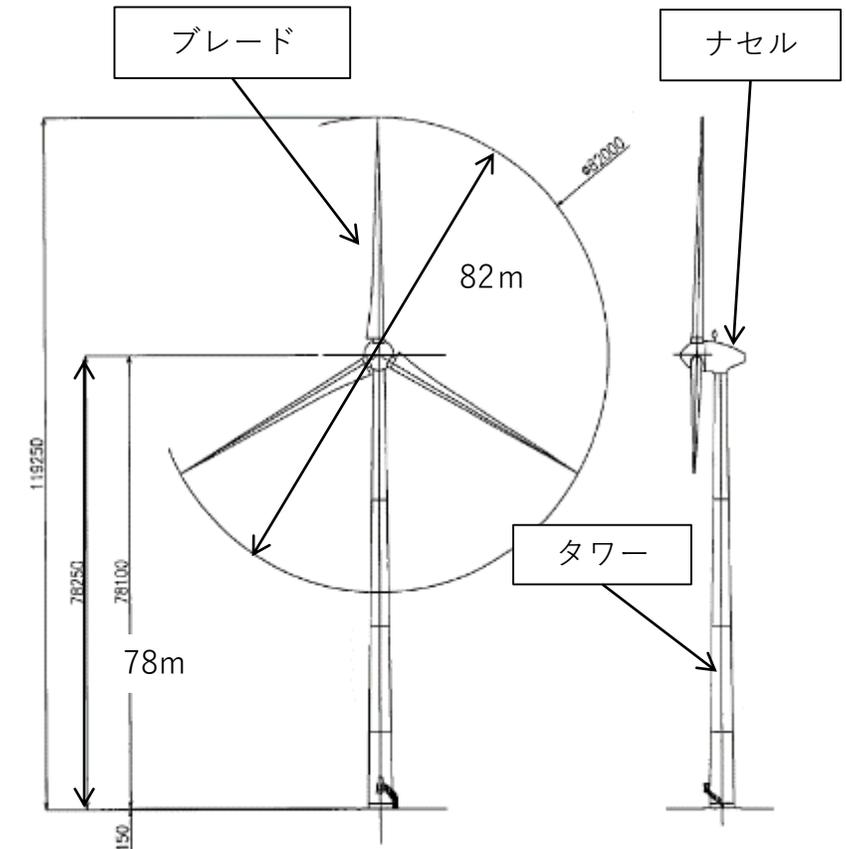


図1 風車外形図

1. 風力発電所の概要



図 2-1 日の岬 WP の位置



事故前の風車



地形全体

2. 事故概要

【当日の運転状況】

2018年9月4日

7時20分頃 セクターマネジメント（風速18m/s以上（10分平均風速））で発電停止
※過去の故障からベアリングへの負荷等を考慮して、上記セクターマネジメントを常時実施中であつた

10時00分頃 当該風車のSCADAデータで風速41.5m/s（3秒平均風速）を記録する。

10時30分頃 **地域停電が発生し、SCADAデータ記録不能**となる

停電に際して、以下の動作を実施

①ヨー制御：停止直前の風向（東南東 102度）を向いて停止
※SCADAデータによる

②ピッチ：バッテリー電源による独立ピッチ制御で、ピッチ角度92度を確保（フェザリング）

③ブレーキ：ピッチおよびヨーのブレーキは無励磁作動型の電磁ブレーキであり、コイルスプリングにてブレーキをロック

12時過ぎ 台風21号 徳島県上陸

2018年9月6日 周辺道路の通行止め解除後に現地確認し、風車の倒壊を発見。

2. 事故概要



タワー中間部（約37m付近）より北西方向へ倒壊

ブレードはナセル部に接続されたまま、地上に落下

地面のナセル向きがヨー制御停止時と異なる



停電時のブレードピッチ動作フロー図

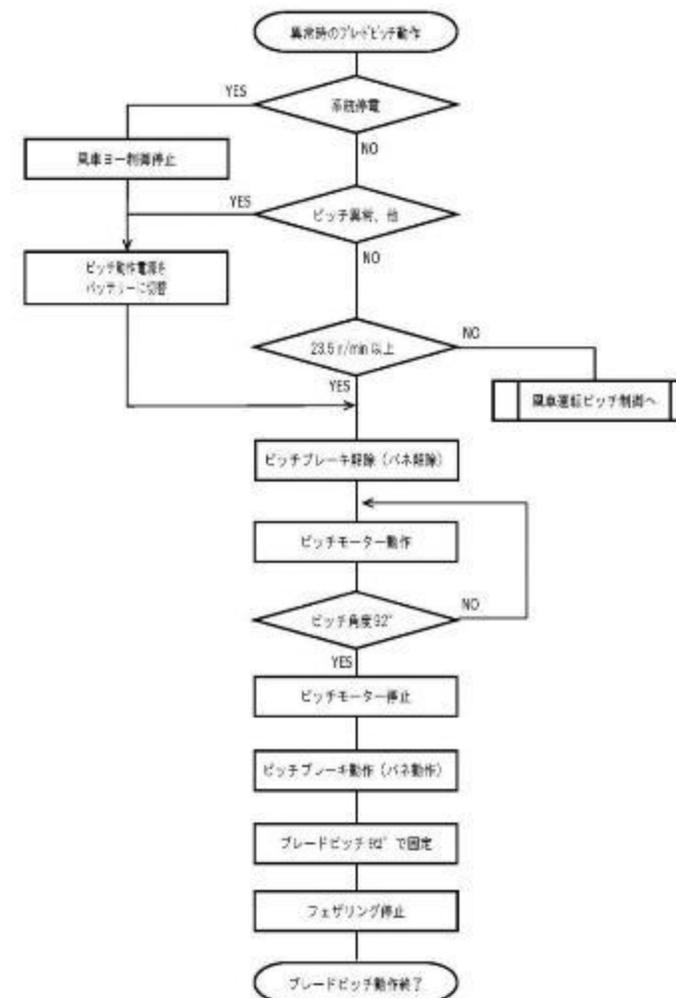
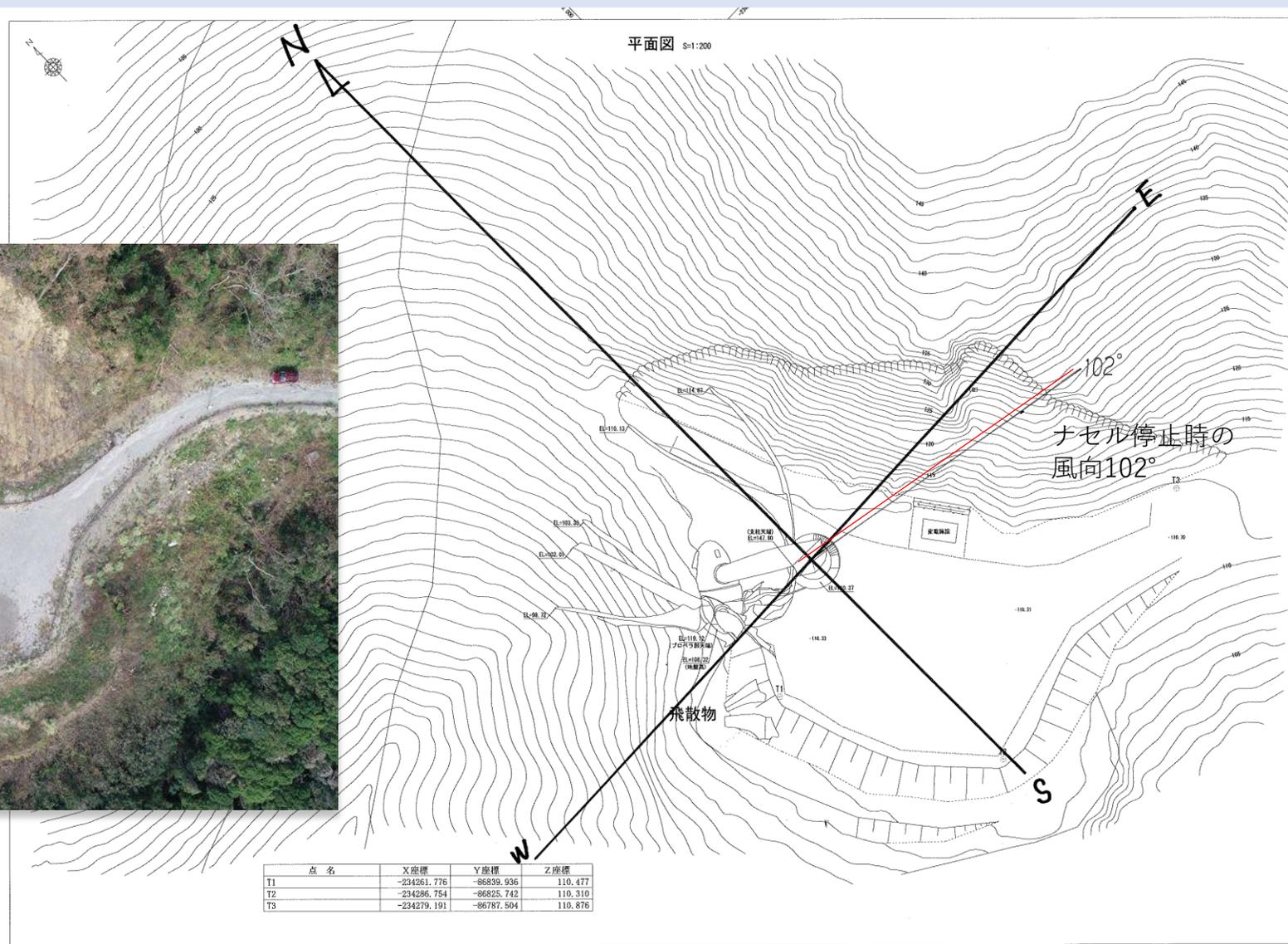


図 停電時のブレードピッチ動作フロー図

2. 事故概要

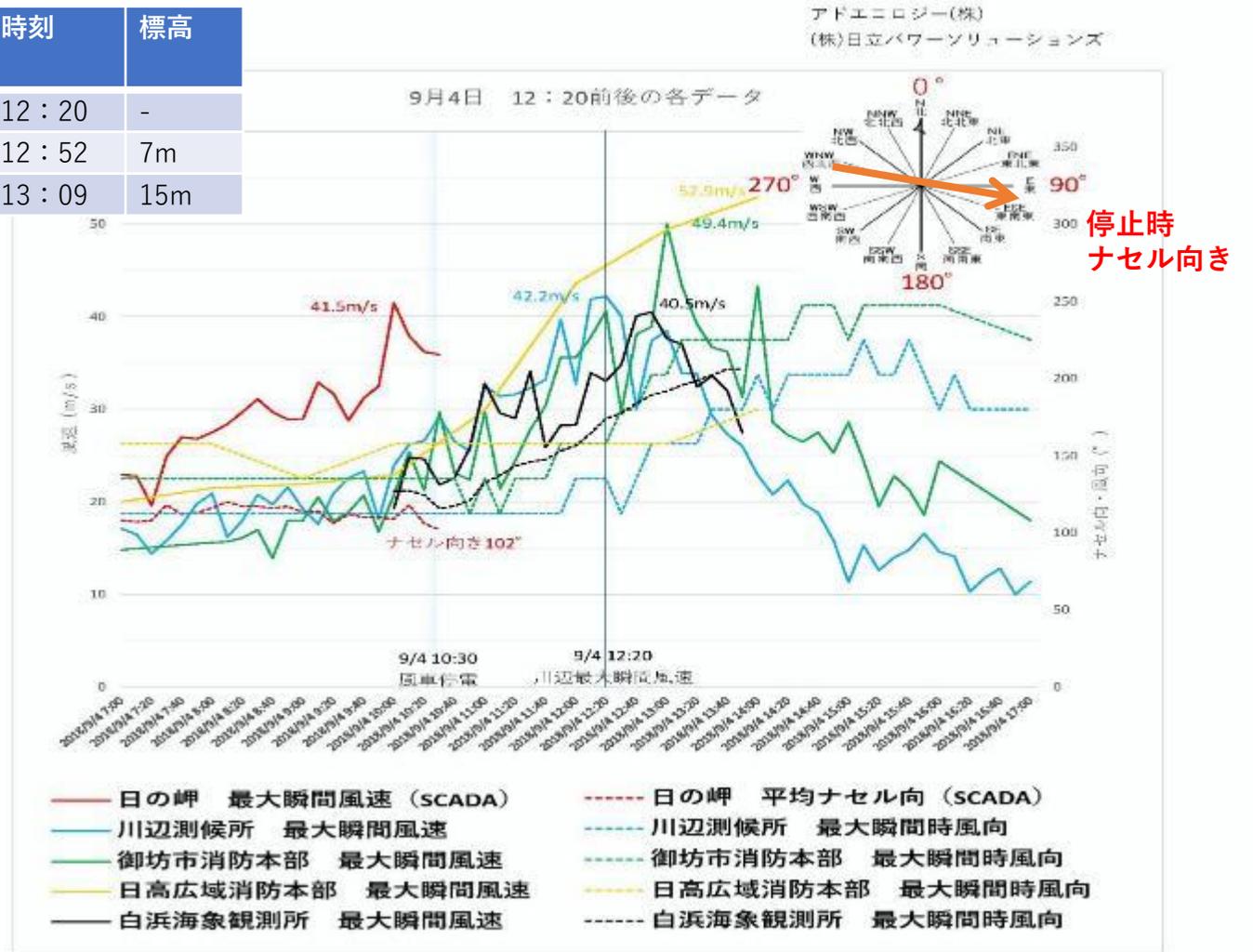
【倒壊状況】



2. 事故概要

【日の岬及び周辺の当日の風況状況】

県内計測箇所	風車との距離	最大瞬間風速 (3秒平均風速)	風向	時刻	標高
川辺観測所	約14km	42.2m/s	南東	12:20	-
御坊消防本部	約8km	50.0m/s	南南西	12:52	7m
日高広域消防本部	約9km	52.9m/s	南	13:09	15m



※白浜海象観測所 データ出典：京都市防災研究所 流域災害研究センター流域圏観測研究領域【白浜海象観測所】 担当 馬場謙之様

3. 事故原因の調査

(1) 設計および施工に係る審査

建築基準法に係る設計および施工に関する審査は以下の通りで、構造の安全性は検証されている。

審査名	許可番号等	交付日
指定性能評価機関による性能評価	BCJ-基評-ST0595-01	平成22年1月15日
国土交通大臣による認定	国住指第4032号	平成22年2月5日
建築基準法に基づく建築確認申請	和歌山県建築主事 H22-4-1号	平成22年4月8日
上記の検査済証	和歌山県建築主事 H22-4-1号	平成22年12月8日

高さ60mを超える工作物

また、表1～3（次頁）に示すように、タワーは設計用荷重に対して適正に設計がなされている。ただし、風力発電施設周辺に居室のある建物はなく、人命に影響を及ぼさないとして、風荷重に関しては再現期間50年の風速を用いている。

3. 事故原因の調査

(1) 設計および施工に係る審査

表-1 設計レベルと設計用荷重の組み合わせ

荷重	荷重レベル	長期荷重組合せ用	稀に発生する荷重組合せ (レベル1) 用
固定荷重		風車製品データに基づく	
積載荷重		なし	
風荷重		発電時最大平均風荷重 (Wgen)	レベル1風荷重 (W _{1s})
			発電時最大風荷重 (Wgen')

発電時最大平均風荷重 (Wgen) : 発電時の平均風速とスラスト係数の組み合わせで求まる最大風荷重
 発電時最大風荷重 (Wgen') : 発電時最大平均風荷重にガスト影響係数を考慮して求まる発電時の最大風荷重
 レベル1風荷重 (W_{1s}) : 基準風速に対する発電停止時の風荷重。ローター回転はフリーかつヨー制御が不能で、ブレードはフェザリング状態のまま横方向から風を受けて1枚は風上を向いた状態

表-2 タワー各部の設計目標

	長期荷重組合せ用	稀に発生する荷重組合せ (レベル1)
タワー鋼管	長期許容応力度	短期許容応力度
接合部フランジ	長期許容応力度	短期許容応力度
接合部高力ボルト※1	長期許容応力度	短期許容応力度※2
アンカーリング	長期許容応力度	短期許容応力度

※1.タワー鋼管接合部の高力ボルトに作用する応力は、テコ反力を考慮して算出する。

※2.「時刻歴解析を行う場合に適用する風車用高力ボルト引張接合、摩擦接合の許容引張力とすべり耐力等の指針」に基づき算出する。

※3風荷重に対しては静的設計を行う。

表-3 設計目標と照査結果

項目		長期	レベル1 (稀/短期)
タワー鋼管	曲げ圧縮	0.437 (L1)	0.648 (S4)
	せん断	0.112 (L1)	0.292 (S1)
接合部フランジ		0.419 (L1)	0.491 (S4)
接合部	引張	0.490 (L1)	0.789 (S4)
ボルト	せん断	0.130 (L1)	0.571 (S1)
開口部		0.482 (L1)	0.673 (S4)
タワー鋼管脚部コンクリート埋設部		0.471 (L1)	0.656 (S4)

※L1 : D+Wgen (固定荷重と発電時最大平均風荷重)

S1 : D+W_{1s} (固定荷重とレベル1横風) S4 : D+Wgen' (固定荷重と発電時最大風荷重)

静的設計では、レベル1の風荷重時に接合部ボルト、開口部、タワー鋼管脚部コンクリート埋設部、タワー鋼管部の順に余裕度が小さくなっていた。

3. 事故原因の調査

(2) 破損現物調査による品質確認

製造・施工に問題がなかったのか、現物に対して以下の調査・点検を実施。

- | | |
|-------------------------|------------|
| 1) ドローンによる倒壊状況の確認 | 補助資料 1 |
| 2) 風車タワー製造に関する記録点検状況 | 補助資料 2 |
| 3) 現地点検状況 | |
| ①解体前タワー内部点検 | 補助資料 3 - ① |
| ②解体前ナセル点検 | 補助資料 3 - ② |
| ③解体前ブレード点検 | 補助資料 3 - ③ |
| ④解体中ヨーギア点検 | 補助資料 3 - ④ |
| ⑤解体中ピッチギア点検 | 補助資料 3 - ⑤ |
| ⑥ナセル方向点検 | 補助資料 3 - ⑥ |
| 4) 分解点検 | |
| ①ピッチモータ#A~C分解点検 | 補助資料 4 - ① |
| ②ヨーモータ#4~6分解点検 | 補助資料 4 - ② |
| 5) 風車タワー鋼材の引張試験及び成分分析結果 | 補助資料 5 |

3. 事故原因の調査

(2) 破損現物調査による品質確認

【確認結果】

(*1) : ○ : 可能性大、△ : 可能性あり、× : 可能性なし

大項目	調査項目	確認内容	確認結果	評価(*1)	
設計的要因	(1) 設計強度不良	強度計算書	強度上、最弱部でタワー座屈	×	
	(2) 材料選定不良	ミルシートとの照合	記録上異常なし	×	
	(3) 構造不良	図面と現品の照合	座屈部板厚の図面と一致を確認	×	
製作上の要因 (品質管理)	(1) 材料不良	ミルシート確認	記録上異常なし	×	
	(2) 引張試験	当該構造物の機械的性質および成分分析	記録上異常なし 現物からテストピース採取し第三者で調査。引張強度、成分分析に異常なし	×	
	(3) 溶接管理不良	(1) 溶接部非破壊検査 (U T)		記録上異常なし	×
		(2) 溶接員の資格および認証		記録上異常なし	×
		(3) 鋼材調達体制		記録上異常なし	×
		(4) 鋼材調達品質管理体制		記録上異常なし	×
	(4) 検査不良	(1) 溶接部非破壊検査 (U T)		記録上異常なし	×
		(2) 塗装検査		記録上異常なし	×
施工要因	(1) 組立不良	据付・組立記録の確認	記録上異常なし	×	

3. 事故原因の調査

(2) 破損現物調査による品質確認

(*1) : ○ : 可能性大、△ : 可能性あり、× : 可能性なし

大項目	調査項目	確認内容	確認結果	評価(*1)
環境要因	(1) 過大風速 (台風)	運転データによる確認	設計風速42.5m/s (10分平均風速) を超過する風速52.2m/s (10分平均風速) を想定	△
	(2) 乱流、渦流影響	運転データによる確認	事故発生前、IEC規格を上回る乱流を計測	△
	(3) 飛来物影響	風車損傷状況、周囲の確認	タワーを倒壊させる飛来物なし	×
	(4) 落雷影響	風車損傷状況の確認	電気品の損傷なし	×
	(5) 停電影響	停電前／タワー倒壊後の風車状況確認	ヨー制御不可、制動力を超える風速によりブレードフェザリング保持不可	△
保守的要因	(1) 作業不良	過去の点検記録確認	点検記録異常なし	×
	(2) 保守不良	過去の点検記録確認	点検記録異常なし	×
	(3) 経年劣化	交換部品の調査確認	タワーに関する交換部品なし	×
運転中要因	(1) トラブル影響	運転中のトラブルによる影響確認	タワー倒壊前にトラブル発生なし	×
	(2) 過大負荷影響	運転データによる確認	過去に主軸ベアリング損傷事故あり	△
	(3) 運転制限影響	運転データによる確認	運転中は運転制限が正常作動	×

3. 事故原因の調査

(2) 破損現物調査による品質確認

【部位別の確認結果】

部位	確認結果	推定	倒壊時の状態
ピッチモーター／ ピッチギア	<ul style="list-style-type: none"> ・分解点検結果、製品異常なし ・ブレーキ滑りを確認 ・ピッチギア全周に異常なし 		製品異常はない
ブレードピッチ	<ul style="list-style-type: none"> ・全3機ピッチモータブレーキ（全3機、ブレード毎に独立、無励磁作動型）により、固定している ・ピッチ角度は、ブレードAが約186度、ブレードBが約193度、ブレードCが約237度であり、ブレードCを除き逆ファイン状態 	ブレードCは、倒壊時にブレードを巻き込んでいることから、他ブレードとのピッチ角度の差は、倒壊時の影響を受けた可能性が高いと推定される	ブレードは強風により、停止時のフェザリング状態から、倒壊時に回転（推定）
	<ul style="list-style-type: none"> ・ブレーキ粉が多量に発生し、焼けた臭いがした ・ピッチブレーキは、74m/s（3秒平均風速）以上で滑りが発生する可能性がある（エネルコン社より確認） 	ブレーキ動作（無励磁作動型）状態で、ブレードが風荷重により、フェザリング状態から逆ファイン状態へ回転したと推定される	約74m/s（3秒平均風速）以上の風速があった（推定）
	<ul style="list-style-type: none"> ・ブレードA, B, Cいずれも損傷していたが、広く飛散していない 	ナセルおよびブレードがタワー倒壊中や地面へ落下した衝撃で損傷したと推定される	ブレードはナセルに接続されたまま
	<ul style="list-style-type: none"> ・風車が過回転（定格回転数18r/min×130%）になると、遠心力によりメカニカル過速度検出が動作し、ブレードをフェザリング位置へ作動させるシステムがある（エネルコン社より確認） 	ローターフリーであっても風車過回転は継続しないと推定される	過回転は発生しない

3. 事故原因の調査

(2) 破損現物調査による品質確認

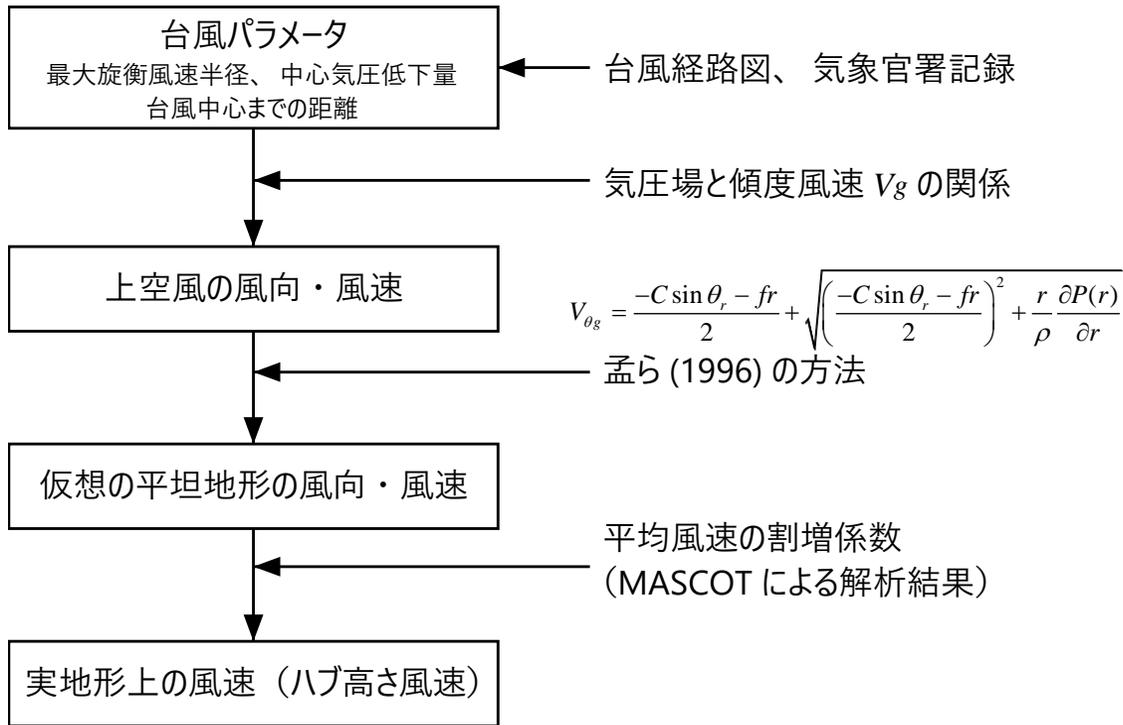
部位	確認結果	推定	倒壊時の状態
ヨーモーター／ ヨーギア	<ul style="list-style-type: none">・ 6台中3台はタワー倒壊により損傷したため点検不可 3台の分解点検結果、製品異常なし・ ブレーキ滑りを確認・ ヨーギア全周に異常なし	<ul style="list-style-type: none">・ 他3台も問題ないものと推定される	製品異常はない
タワーヨー制御	<ul style="list-style-type: none">・ 停電直後のナセルは東南東（102度）方向を向いていた・ タワー倒壊後のナセルは北北西（約330度）方向を向いていた (真北が0度)	<ul style="list-style-type: none">・ ブレーキ動作（無励磁作動型）状態で、ヨーが東南東から北北西へ約130度 反時計回りに回転したと推定される・ タワー倒壊時にタワートップのナセル自重でヨーが回転したと推定される	ナセルは、停止時の東南東（102度）を維持



タワーの設計・製造・施工に瑕疵がないことを確認

4. 時刻歴応答解析による検証 (1) 台風モデルによる風況解析

・ 台風モデルによる風速推定フロー



(参考文献)

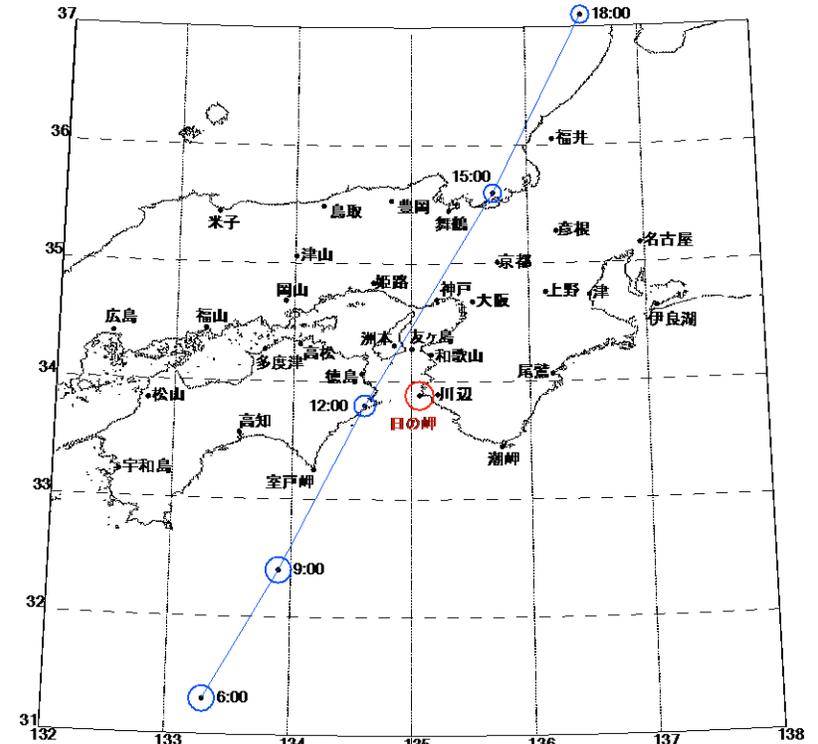
水域ネットワーク、MASCOT Offshore簡易マニュアル、2014年

安井八紀、大熊武司、吉江慶祐、片桐純治、廣川雅一：モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションに関する研究、第16回風工学シンポジウム、441-446、2000

孟岩、松井正宏、日比一喜、中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その2 台風時の強風：日本風工学会誌、第66号、3-14、1996

・ 台風経路図

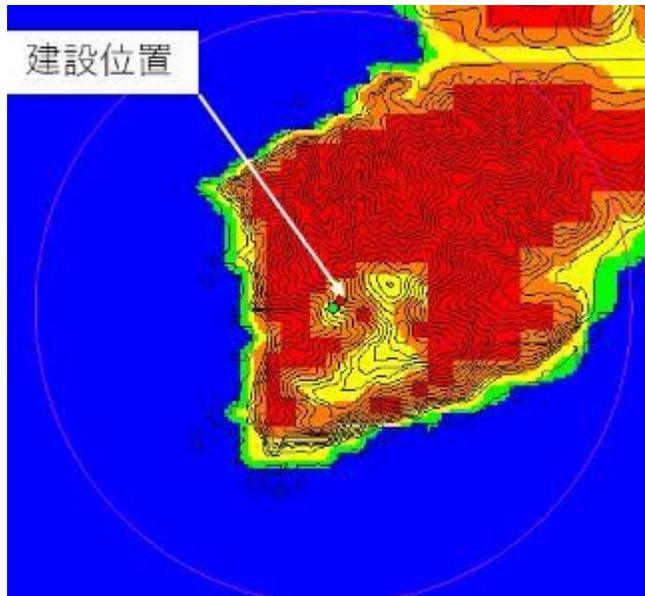
2018年9月4日 12時頃に風力発電所に最接近



4. 時刻歴応答解析による検証

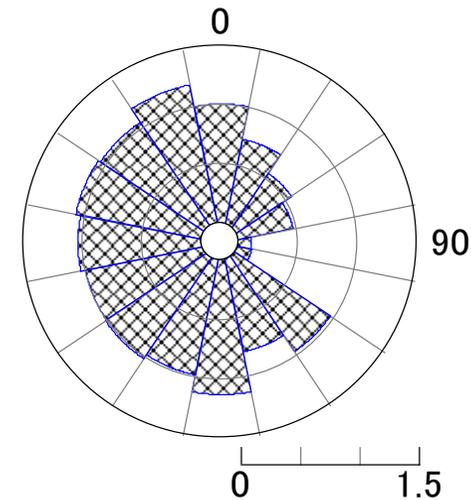
(1) 台風モデルによる風況解析

- 解析モデル
 - 解析風向 16方位 (@22.5°)
 - 解析領域 4400m×4400m
 - 水平方向最小メッシュサイズ 12.5m
 - 建設地周辺は、地形データとして基盤地図情報数値標高モデル、地表面粗度データとしてGoogle Mapから読み取った粗度長を与えている



モデル化状況（建設位置の詳細）

- 平均風速の割増係数 E_{tv}
 - 東よりの風向で風速が極端に小さい
 - 建設地点東側の尾根の影響
 - 南～西～北 $E_{tv}=0.97\sim1.20$
 - 海側に開けた斜面の中腹

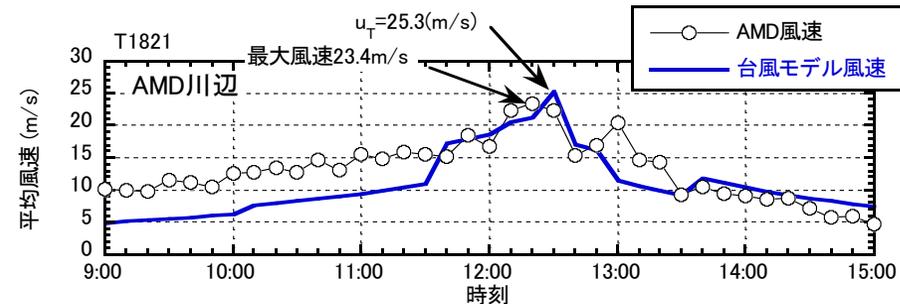
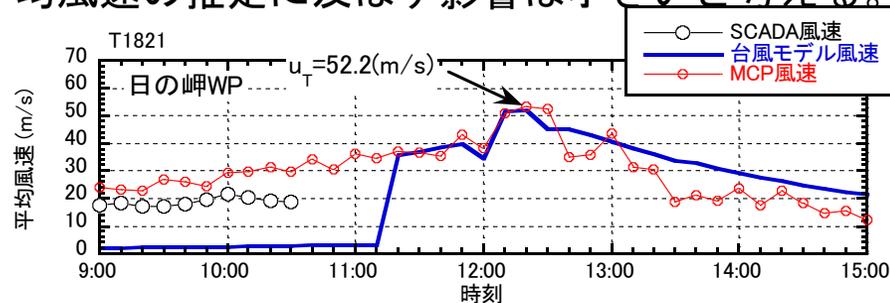


平均風速の割増係数 E_{tv}

4. 時刻歴応答解析による検証 (1) 台風モデルによる風況解析

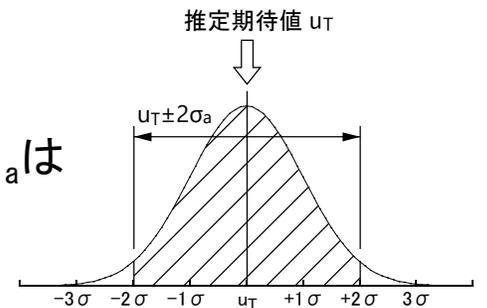
• ハブ高さ10分平均風速時系列の推定結果（台風パラメータに基づく推定）

- 近傍のAMD川辺についても風速の推定を実施し、推定手法の妥当性を確認
- 日の岬WPの11:10までの10分平均風速が極端に低いのは、東寄りの風向で地形の影響を受け10分平均風速の割増係数が小さいため。
- 最大10分平均風速が生じる12時付近の風向は南寄りであり、東寄りの風向の推定精度が悪いことが最大10分平均風速の推定に及ぼす影響は小さいと考える。



• ハブ高さ最大10分平均風速の推定結果

- 台風モデルから推定したハブ高さの最大10分平均風速の期待値 u_T は**52.2m/s**
 - 大臣認定時の設計ハブ高さ風速は48.0m/sであり、推定値はこれを上回る。
 - 10分平均風速は推定した u_T を中心に分布し、正規分布と仮定するとその標準偏差 σ_a は $0.1u_T$ とされる（安井他）。
- 推定のバラつき範囲を $\pm 2\sigma_a$ （注）とすると、**41.8~62.6m/s**となる。



注：信頼度としてよく用いられる95%とすると、正規分布ではおよそ平均 $\pm 2\sigma$ が信頼区間となる

4. 時刻歴応答解析による検証 (2) 解析条件

■ エネルコン社による解析条件

- ① 台風モデルによる推定値(12:20, V50=62.6m/s, 風向189.8°、風速推定のバラツキを考慮した値)
(V50:ハブ高さ10分間平均風速 :本来は50年間再現期待値だが、ここでは解析に用いるハブ高さ10分間平均風速)
- ② ナセルは、停止時の102° で固定
- ③ Ve50算出は、ウインドファーム認証に係る技術資料(日本海事協会)Annex C 風条件を参照
- ④ ガストファクターは、設計風速時の乱流強度Ih1と乱流強度の補正係数EtIから求めた

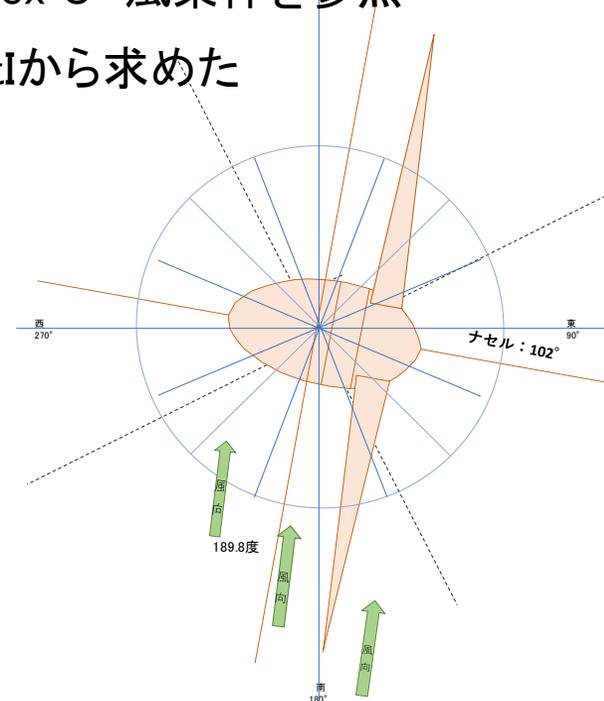
$$Gf = 1 + 3.5 \times Ih1 \times EtI = 1.57$$

$$Ih1 = 0.135, EtI = 1.206 \text{ (風向Sの値)}$$

$$Ve50 = V50 \times Gf = 62.6 \times 1.57 = 98.2 \text{ m/s}$$



Gf: ガストファクター
 V50: ハブ高さ10分間平均風速
 Ve50: 極値3秒平均風速
 Ih1: 設計風速時の乱流強度
 EtI: 乱流強度の補正係数



Accident WEC info			Estimated WEC condition at accident						Wind info			
WEC	Rated power (kW)	Hub height (m)	Time	Wind dir (deg)	Nacelle dir (deg)	Pitch angle and brake	Yaw brake	Rotor	V50 (m/s)	Ve50 (m/s)	Shear	Inflow angle (deg)
E-82 E1/S/77/4F/01	2000	78	2018/9/4 12:20	189.8	102	Feathering, Active (brake might start slipping)	Active	Free	62.6	98.2	0.84	2.74

4. 時刻歴応答解析による検証 (2) 解析条件

- 動的解析に用いた解析ソフトウェア

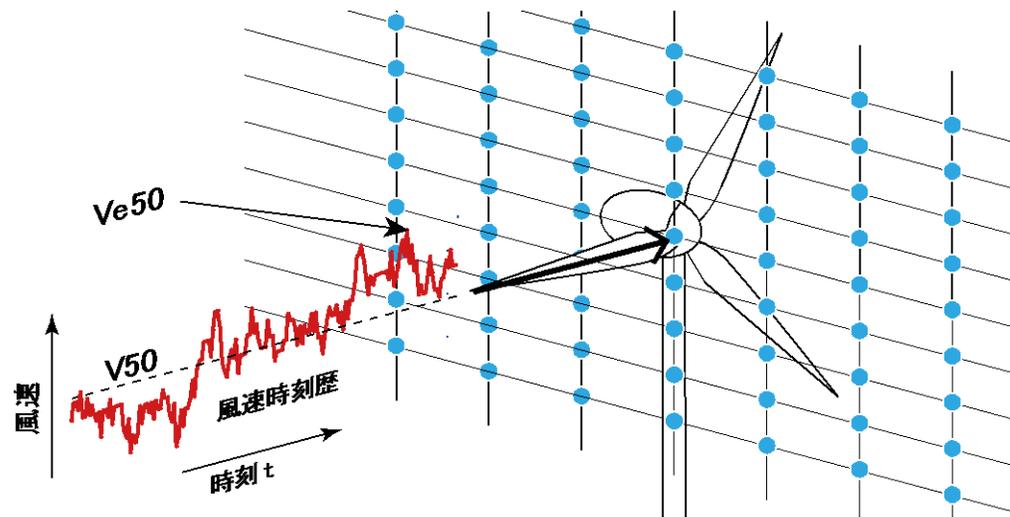
Bladed, 開発元 DNV-GL(<https://www.dnvgl.com>)

- 時間領域変動風速場の作成

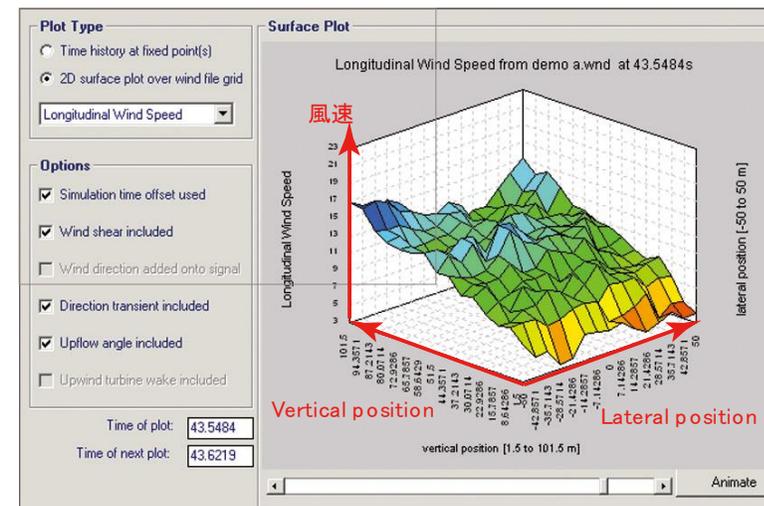
3次元の変動風速場の時刻歴を作成

(IEC61400-1, Annex B Kaimal spectrum and exponential coherence model)

本解析では、サイト風条件として前ページの条件を与えた ($V_{50}=62.6\text{m/s}$ 、 $V_{e50}=98.2\text{m/s}$)



時間領域変動風速場のイメージ



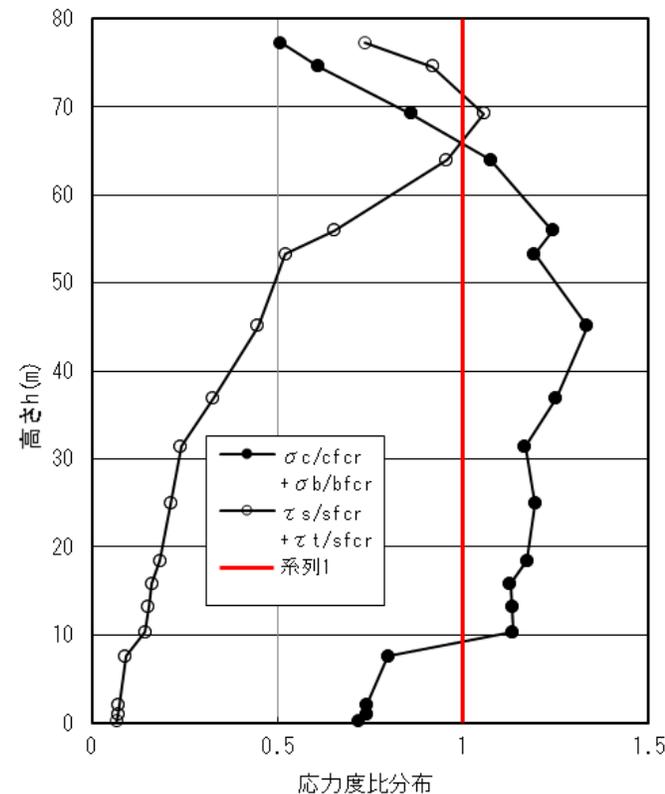
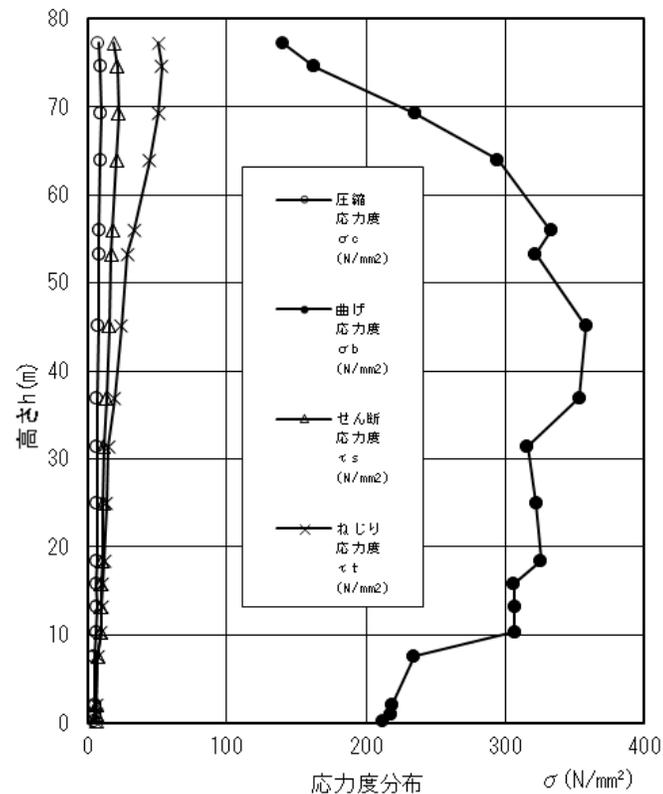
時間領域変動風速場の例 (Bladedパンフレットから)
コンターは、ある時刻のY-Z平面の風速瞬間値 (縦軸: 風速)

4. 時刻歴応答解析による検証 (3) 断面照査

エネルギー社で実施された時刻歴応答解析により求めたタワー各部位における最大応答応力の包絡線を用いて断面照査を実施した。

図1に応力度及び検定比の高さ方向部分分布図を、表1（次頁）に各計算点における最大応力度に対する断面照査結果を示す。

図1_時刻歴応答解析により求めた横風時のタワー応力



- 凡例
- ● - 曲げ圧縮検定比
 - ○ - せん断検定比
- 検定比: 実応力/許容応力 (許容応力度相当)
- 系列1 - (赤線)
- 1を超えた場合、鋼材の降伏点強さを超え、弾性状態ではなくなる。(折れたまま)

4. 時刻歴応答解析による検証 (3) 断面照査

表 1 時刻歴応答解析結果の各計算点の最大応答応力を用いた断面照査結果

要素番号	部位	節点高さ Z(m)	外径 D(mm)	板厚 t(mm)	基準強度 (F値)	圧縮 応力度 σ_c (N/mm ²)	曲げ 応力度 σ_b (N/mm ²)	せん断 応力度 τ_s (N/mm ²)	ねじり 応力度 τ_t (N/mm ²)	許容応力度相当：短期			$\sigma_c/cfcr + \sigma_b/bfcr$	$\tau_s/sfcr + \tau_t/sfcr$	判定
										cfcr (N/mm ²)	sfcr (kN/m ²)	bfcr (kN/m ²)			
17	上端	77.25	2000	25	290	7.87	139.9	19.0	50.84	290.0	94.8	290.0	0.510	0.736	OK
	下端	74.59	2079	25	290	7.57	143.9	18.2	47.05	290.0	93.9	290.0	0.522	0.695	OK
16	上端	74.59	2079	22	281	9.04	162.8	21.4	53.47	279.3	81.4	281.0	0.612	0.920	OK
	下端	69.27	2236	22	281	8.40	214.7	19.9	46.22	276.9	80.0	279.6	0.798	0.827	OK
15	上端	69.27	2236	20	290	9.67	235.6	22.5	50.84	281.4	69.3	284.9	0.861	1.057	NG
	下端	63.95	2393	20	290	9.03	295.0	21.0	44.39	278.6	68.3	282.7	1.076	0.958	NG
14	上端	63.95	2393	22	281	8.89	268.8	19.8	40.35	274.5	79.0	277.6	1.001	0.761	NG
	下端	55.97	2630	22	281	8.08	333.0	18.0	33.41	270.9	78.6	274.7	1.242	0.654	NG
13	上端	55.97	2630	24	281	7.66	306.0	16.8	30.63	274.2	87.0	277.4	1.131	0.545	NG
	下端	53.25	2710	24	281	7.43	321.7	16.3	28.84	273.1	87.1	276.5	1.191	0.518	NG
12	上端	53.25	2710	24	281	8.13	321.7	16.8	28.84	273.1	87.1	276.5	1.193	0.523	NG
	下端	45.08	2950	24	281	7.46	358.3	15.4	24.34	269.8	88.5	273.8	1.336	0.449	NG
11	上端	45.08	2950	26	297	7.57	331.4	14.7	22.47	286.9	96.9	290.7	1.166	0.384	NG
	下端	36.90	3190	26	297	6.99	353.2	13.6	19.22	283.5	99.8	288.0	1.251	0.329	NG
10	上端	36.90	3190	30	280	6.54	307.3	12.1	16.65	274.4	108.7	277.4	1.132	0.265	NG
	下端	31.45	3350	30	280	6.22	316.1	11.5	15.10	272.6	111.0	276.0	1.168	0.240	NG
9	上端	31.45	3350	30	281	6.79	316.1	11.7	15.10	273.5	111.2	276.9	1.166	0.241	NG
	下端	24.95	3549	30	281	6.40	322.3	11.1	13.45	271.3	114.9	275.1	1.195	0.213	NG
8	上端	24.95	3549	30	292	6.93	322.3	11.3	13.45	280.8	117.4	284.9	1.156	0.211	NG
	下端	18.45	3747	30	292	6.56	325.6	10.7	12.07	278.4	123.1	283.0	1.174	0.185	NG
7	上端	18.45	3747	32	284	6.36	305.7	10.0	11.32	274.3	124.8	278.1	1.123	0.171	NG
	下端	15.85	3827	32	284	6.23	306.5	9.8	10.85	273.5	127.4	277.4	1.128	0.162	NG
6	上端	15.85	3827	32	284	6.47	306.5	9.9	10.85	273.5	127.4	277.4	1.129	0.163	NG
	下端	13.25	3906	32	284	6.34	307.0	9.7	10.41	272.6	130.4	276.7	1.133	0.154	NG
5	上端	13.25	3906	32	284	6.62	307.0	9.7	10.41	272.6	130.4	276.7	1.134	0.154	NG
	下端	10.33	3999	32	284	6.46	306.7	9.5	9.93	271.6	134.5	275.9	1.135	0.144	NG
4	上端	10.33	3999	42	302	5.17	235.5	7.3	7.57	298.1	152.8	300.7	0.800	0.097	OK
	下端	7.56	4088	42	302	5.05	234.9	7.1	7.24	297.3	156.9	300.1	0.800	0.091	OK
3	上端	7.56	4088	52	275	4.54	191.1	5.8	5.85	275.0	150.9	275.0	0.711	0.077	OK
	下端	2.00	4265	52	275	4.35	190.0	5.5	5.37	275.0	158.8	275.0	0.707	0.069	OK
2	上端	2.00	4265	45	303	5.13	218.4	6.4	6.21	299.2	172.6	301.8	0.741	0.073	OK
	下端	0.90	4300	45	303	5.08	218.1	6.3	6.11	298.9	174.9	301.6	0.740	0.071	OK
1	上端	0.90	4300	45	303	5.17	218.1	6.3	6.11	298.9	174.9	301.6	0.741	0.071	OK
	下端	0.15	4385	45	303	5.07	211.8	6.2	5.88	298.1	174.9	301.0	0.721	0.069	OK

座屈位置



1) 断面照査に使用した筒身鋼板の基準強度はメーカー提示の鋼板割付図とミルシートにおける降伏強度を採用した。

2) 許容応力度相当について
cfcr：弾性軸圧縮軸座屈応力度より求めた筒身鋼板の許容圧縮応力度

sfcr：弾性曲げ座屈応力度より求めた筒身鋼板の許容せん断応力度

bfcr：弾性せん断座屈応力度より求めた筒身鋼板の許容曲げ応力度

※表 1 における許容応力度相当は、実強度による弾性座屈応力度 σ_{cr} をタワーの半径板厚比に応じて低減した応力度である。算定式は風力発電設備支持物構造計算指針・同解説2007年版による

4. 時刻歴応答解析による検証 (3) 断面照査

■ 本件構造設計者の見解

- ・台風シミュレーション+MASCOT解析により求めたハブ高さの風速は、62.6m/s(10分平均風速)となり、原設計におけるハブ高さの風速は、48.0m/s(10分平均風速)であり、設計条件の風速を上回ること。
- ・時刻歴応答解析結果と鋼板のミルシートに記載された降伏点強度を用い、許容応力度設計により断面照査を行ったところ、曲げモーメントに対しては、現地測量での座屈高さである36.9mでは検定比が二番目に大きな1.251となっていること。
- ・P.9静的設計である原設計での余裕度からは、接合部ボルト、開口部、タワー鋼管脚部コンクリート埋設部、タワー鋼管部の順に余裕度が小さくなっているが、タワー鋼管部以外の降伏は、すぐには崩壊に至らない靱性が期待できる降伏であること。

以上のことから、弾性解析ではあるが、解析動的解析によって、原設計におけるハブ高さの風速は48.0m/s(10分平均風速)以上の風速を受け、筒身圧縮側に屈腹現象が発生し、タワーの倒壊に至ったことが再現できたと考える。

5. タワー倒壊の推定原因

【屈服座屈の発生フロー(推定)】

- ・タワーに曲げが加わるにつれて、屈服座屈により断面が楕円形状となる。
- ・それに伴いタワーの部材せい(見付幅)が小さくなるため、断面2次モーメントも小さくなり、次第に実質的な曲げ剛性が小さくなる。
- ・その影響で、断面変形の無い線形挙動から非線形挙動となり、最終的には断面がある程度扁平な楕円形状になったところで、抵抗力をこえる圧縮力が加わり、崩壊に至る。

【タワー倒壊の原因】

- ・原設計では再現期間50年の風荷重で静的設計が行われていたこと
- ・製造、施工管理はきちんと行われていたこと
- ・材料強度に問題はなかったこと
- ・接合部を含めタワーの座屈以外の損傷はみられなかったこと
- ・時刻歴応答解析でタワーの座屈が確認できたこと

以上から、タワー倒壊の原因は、電源喪失により、風向の変化に伴い横風を受け、設計で想定された風荷重を超えた荷重が作用した結果と推定する。

6. 再発防止について

事故発生から、原因究明に約1年近い時間を要しましたが、主な理由は下記の通りです。

1. 当該地域で広範囲の停電が発生し、事故時点の風速や風向データが無いため、シミュレーションによる解析となり、また倒壊状況・時間も不明であった。
2. 大型風車のタワー座屈倒壊事故の前例がほとんど無く、2台の大型クレーンの手配、2次災害防止（冬季かつ沿岸強風に対する火気不使用・施工計画立案等）に時間を要し、解体着手が事故から約3ヶ月後となった。
3. ナセルが急斜面際に落下しており、落下状態での調査に限界があった。ドローン調査、風況シミュレーションは早期に対応できたが、解体作業と並行してのヨー、ピッチの取外しての状況確認となり、分解調査も手間取った（約1ヶ月遅延）
4. 契約上、メーカーがクローズ（タワー、ブレード構造および強度等）している情報があり、国内の第三者による分析が出来なかった。
5. メーカーによる時刻歴応答解析において、シミュレーション解析結果、タワー／ブレード損傷状況など全ての情報が整わないとメーカー解析に着手できなかった。また、事業者・OM会社とメーカーとの情報共有・意思疎通に手間取り、検証・解析着手が遅れた。

6. 再発防止について

アドエコロジー(株)としては、当該サイトでの風車再設置はせずに、事業再開を行わない予定ですが、原因究明が難航したことを踏まえ、今後の事故原因の早期究明並びに事故の再発防止に向けて、以下を提言します。

1. 停電時でも風速・風向を記録できる媒体の設置
2. 監視カメラによる事故状況の把握(停電時対応も必要)
3. メーカー窓口と情報共有するだけでなく、日本のメーカープロマネへの情報共有を実施し、多方面での意思疎通
4. 暴風、系統停電時に十分な強度を確認できない場合における運転制御可能なバックアップ電源の確保(ヨ一制御、フェザリング維持ができれば大事故を回避)

※ドローン調査、3次元測量は有効

以 上

(参考) 各風速のまとめ

1. 風車IECクラスII Aの基本パラメータ (ハブ高さ) (支柱部は次の2.支持構造物で算出)

項目	時間	説明	数値	備考
年平均風速	10分平均		8.5 m/s	$V_{ave} = V_{ref} \times 0.2$
乱流強度		風速15m/s	0.16	I_{ref}
10分間平均基準風速	10分平均	再現期間50年の10分間平均風速	42.5 m/s	V_{ref}
風速ガスト			1.4	
極値風速	3秒平均	再現期間50年のガスト	59.5 m/s	$V_{e50} = V_{ref} \times 1.4$ (風速ガスト)

2. 支持構造物の性能評価時

項目	時間	説明	数値	備考
年平均風速(観測結果)	10分平均	2006年6月~1年間の現地実測データ	7.9 m/s	
乱流強度(観測結果)		風速15m/s	0.11	
建築基準法施行令87条 基準風速	10分平均	和歌山県	34.0 m/s	V_o
設計風速	10分平均	ハブ高さにおける評価風速	48.0 m/s	$V_o \times$ 地形による割増係数1.04 \times 高度補正係数1.358

3. 台風モデルによる風況解析

項目	時間	説明	数値	備考
近傍気象官署データの観測値	最大瞬間風速	台風1821における和歌山県アメダス川辺観測点データ	42.2 m/s	気象庁公開データより
	最大平均風速	同上	23.4 m/s	同上
台風モデル+MASCOT解析による推定風速	ハブ高さ平均風速	10分平均	10分間平均風速の推計値の最大値	52.2 m/s
		10分平均	推定のバラつきを考慮して、上記に $+2\sigma$ した値	62.6 m/s
	最大平均風速	10分平均	アメダス川辺観測点推定値	25.3 m/s

4. 時刻歴応答解析

項目	時間	説明	数値	備考
10分間平均風速 V_{50}	10分平均	ハブ高さ平均風速	62.6 m/s	風速推定のバラつきを考慮した値を採用
風速ガスト			1.57	Class NKウインドファーム認証に係る技術資料に基づきガストファクターを求めて算出
極値3秒平均風速 V_{e50}	3秒平均		98.2 m/s	

5. その他

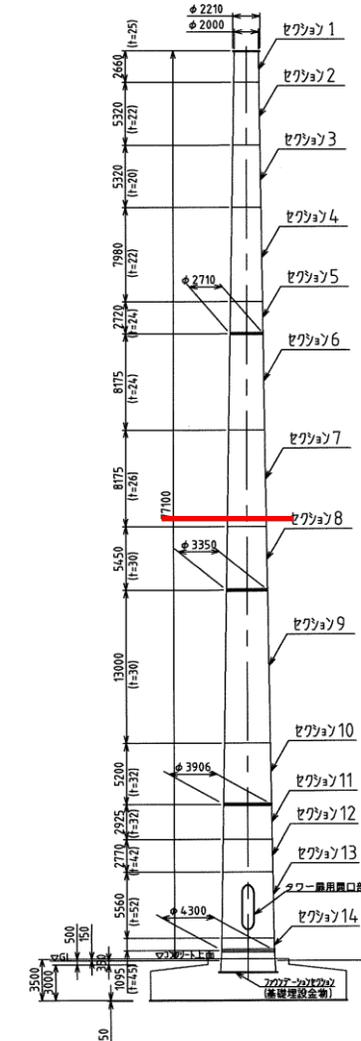
ピッチモーターブレーキが滑る風速	3秒平均	数値はエネルコン社から確認。	74以上 m/s	風車メーカーの既往案件実績値
------------------	------	----------------	----------	----------------

補助資料 1

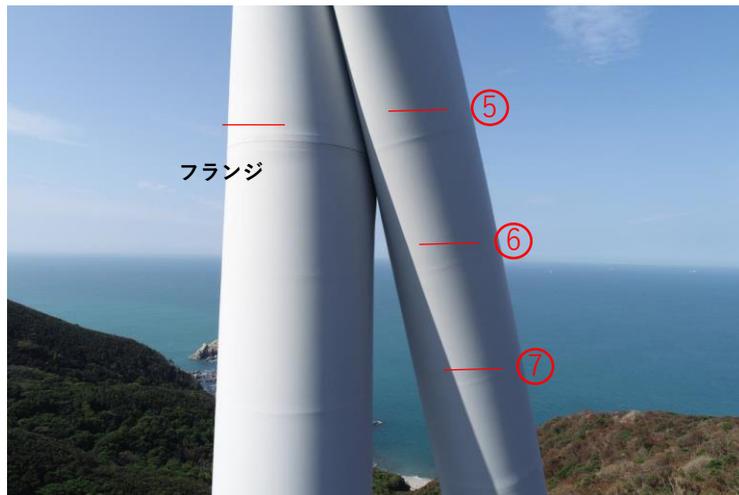
1) ドローンによる倒壊状況の確認



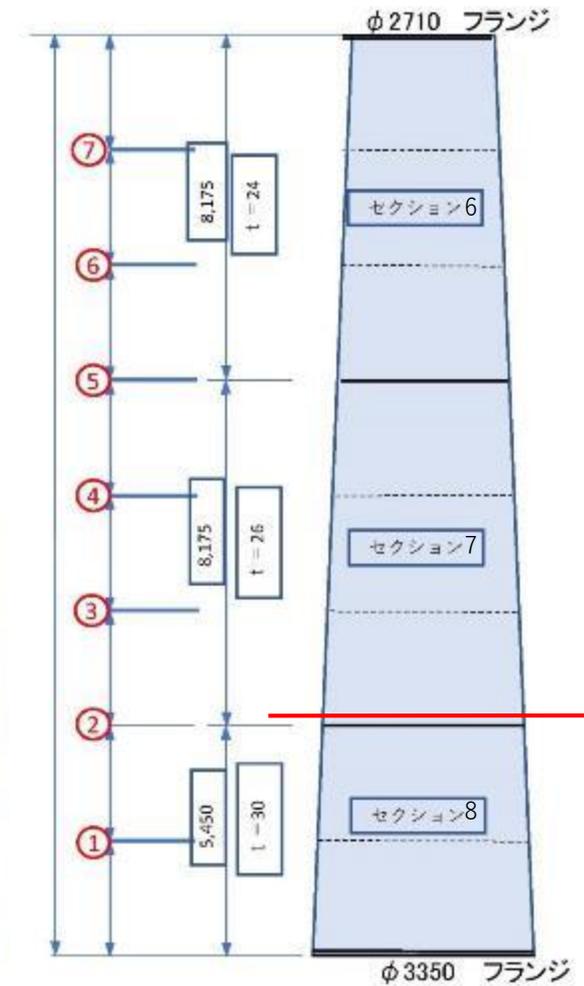
ドローン計測によるタワー折損部位置は、地上36.98m
ここは板厚が30mmから26mmに下がる変位点



補助資料 1



溶接線の位置

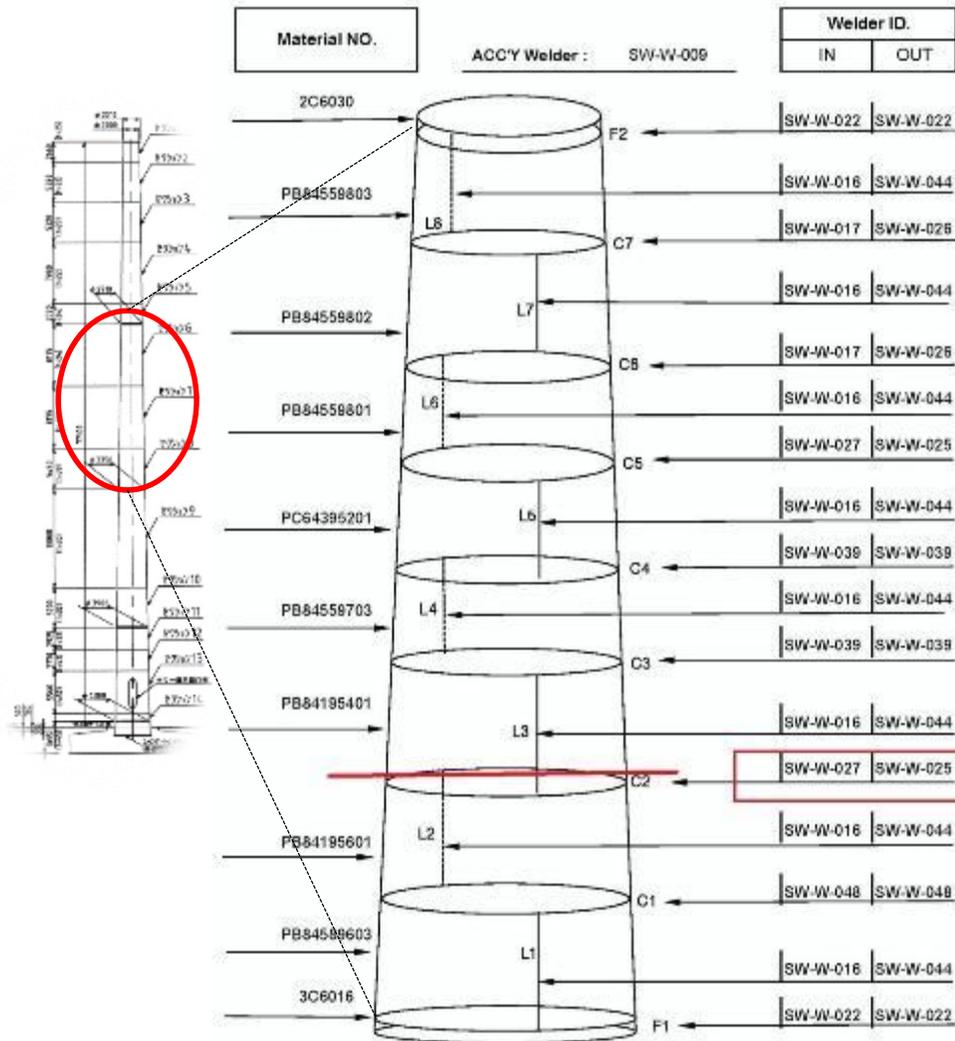


補助資料 2

2) 風車タワー製造に関する記録点検状況

点検項目	点検結果
風車タワー製造メーカー	株式会社 東国S&C (Dong-kuk S&C) 国土交通大臣認定書取得
製造したタワーの種類	日本国内向けEnercon社製タワー全数
鋼材の品質管理	ミルシート；合格
溶接の品質管理	<ul style="list-style-type: none">・ 溶接部非破壊検査 (UT) ；合格・ 鋼材調達を含む製造体制…確認済み・ 鋼材調達を含む品質管理体制…確認済み・ 溶接員の資格および認証…確認済み
製品の品質管理	製造メーカーの検査証明書 原材料、溶接部非破壊検査 (UT)、塗装検査結果；合格
溶接方法	<ul style="list-style-type: none">・ サブマージアーク溶接・ 自動溶接・ 溶接後の焼鈍は実施しない
溶接材料	現代綜合金属 株式会社 (Hyundai Welding) 製 サブマージアーク溶接材料 SAW S-787TB×H-14

補助資料 2



溶接員の資格

No	Welder ID	Name (Korean / English)	Welding Position approved	Base metal Thickness approved	Welding Process approved	Date of Initial Test	According to AWS D1.1
1	SW-W-007	溶接姿勢 1G (下向き) 2G (横向き) 3G (立向き) ※ 1G/1G 右の溶接方法別姿勢	1G, 2G, 3G	3mm<T<Unlimited	FCAW / SAW	2009-09-01	V
2	SW-W-009		1G	3mm<T<Unlimited	FCAW	2009-09-01	V
3	SW-W-016		1G / 1G	3mm<T<Unlimited	FCAW / SAW	2009-09-01	V
4	SW-W-017		1G	3mm<T<Unlimited	SAW	2009-09-01	V
5	SW-W-022		1G	3mm<T<Unlimited	SAW	2009-09-01	V
6	SW-W-025		1G / 1G	3mm<T<Unlimited	FCAW / SAW	2009-09-01	V
7	SW-W-026		1G	3mm<T<Unlimited	SAW	2009-09-01	V
8	SW-W-027		1G / 1G	3mm<T<Unlimited	FCAW / SAW	2009-09-01	V
9	SW-W-039		1G, 2G, 3G	3mm<T<Unlimited	FCAW / SAW	2009-09-01	V
10	SW-W-044		1G	3mm<T<Unlimited	SAW	2009-09-01	V
11	SW-W-048		1G, 2G, 3G / 1G	3mm<T<Unlimited	FCAW / SAW	2009-09-01	V
12	SW-W-049		1G	3mm<T<Unlimited	SAW	2009-09-01	V
Total							12

溶接方法 (アーク溶接の種類)

FCAW : Flux Cored Arc Welding
フラックスワイヤ使用ガスアーク溶接

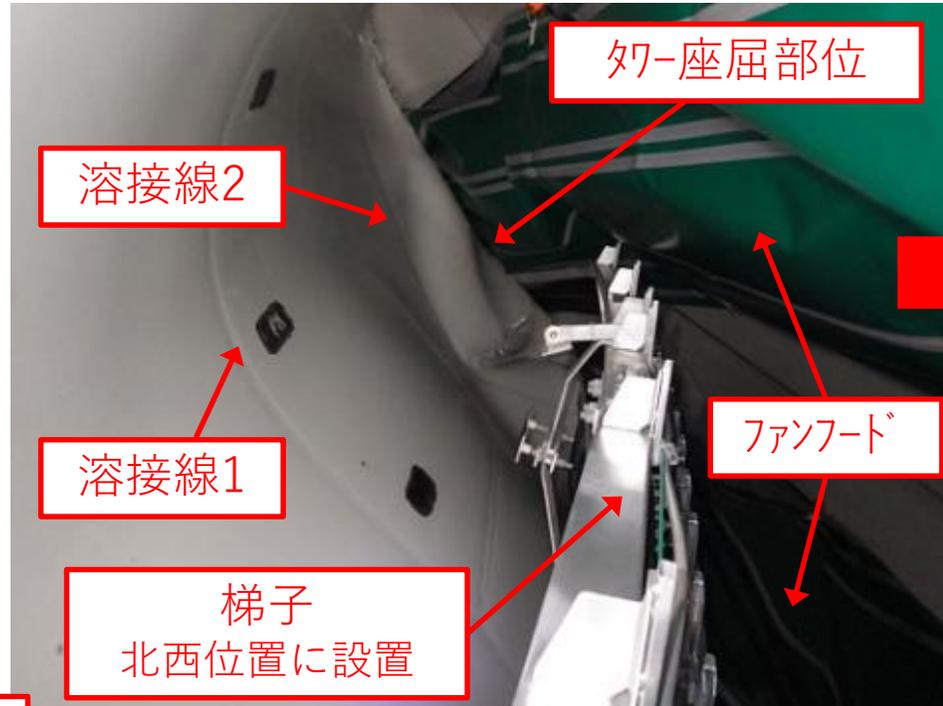
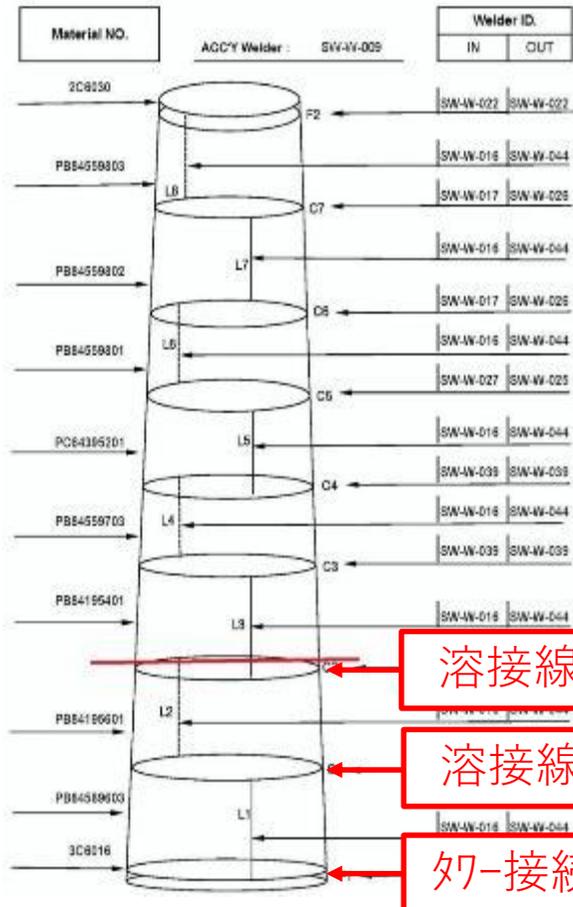
SAW : Submerged Arc Welding
サブマージアーク溶接

折損付近の溶接者は 1 G (下向き) の有資格者が対応

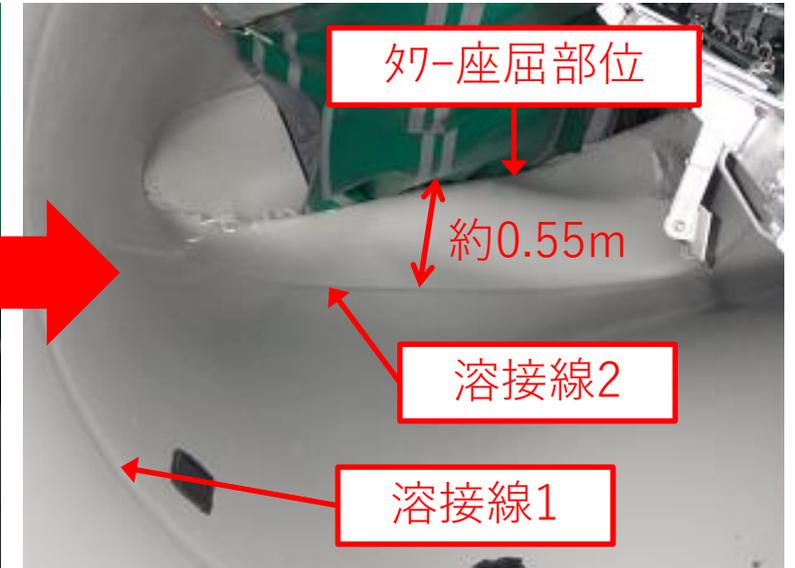
補助資料 3 - ①

3) 現地地点検状況

① 解体前タワー内部点検



- ﾀﾞﾌﾞ-は北西側に座屈
- 溶接線2より上部で座屈 (ドローン計測結果と一致)
- ﾀﾞﾌﾞ-接続ﾌﾗﾝｼﾞは損傷していない



補助資料 3 - ②

②解体前ナセル点検

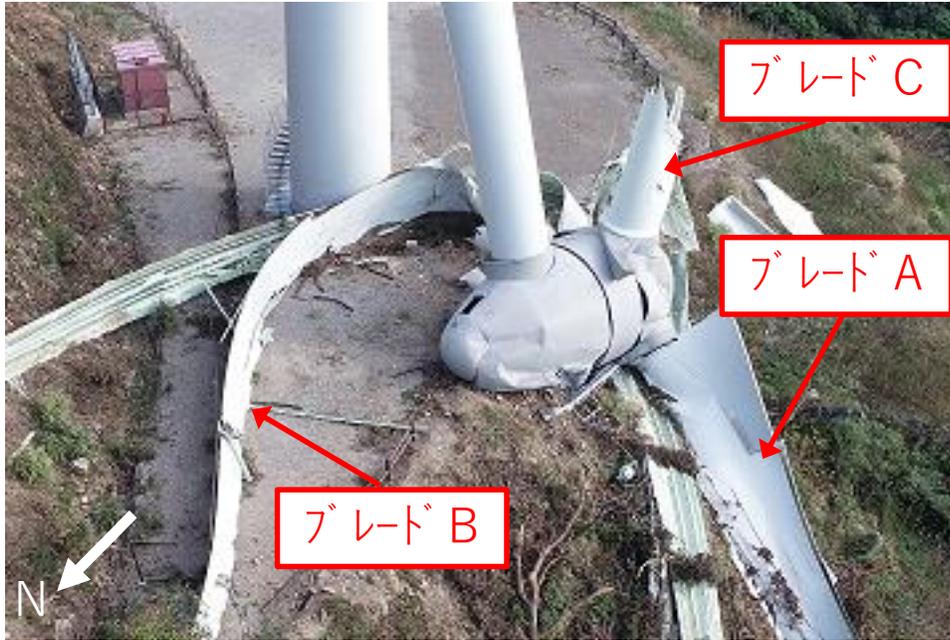


- ・ナセル；現状は南西を向いている
- ・ヨーモーター；外観上異常なし
地面に落下したものは、落下衝撃で損傷あり
- ・ヨーギア；外観上異常なし
ギア面すべりなし



補助資料 3 - ③

③解体前ブレード点検(1/2)

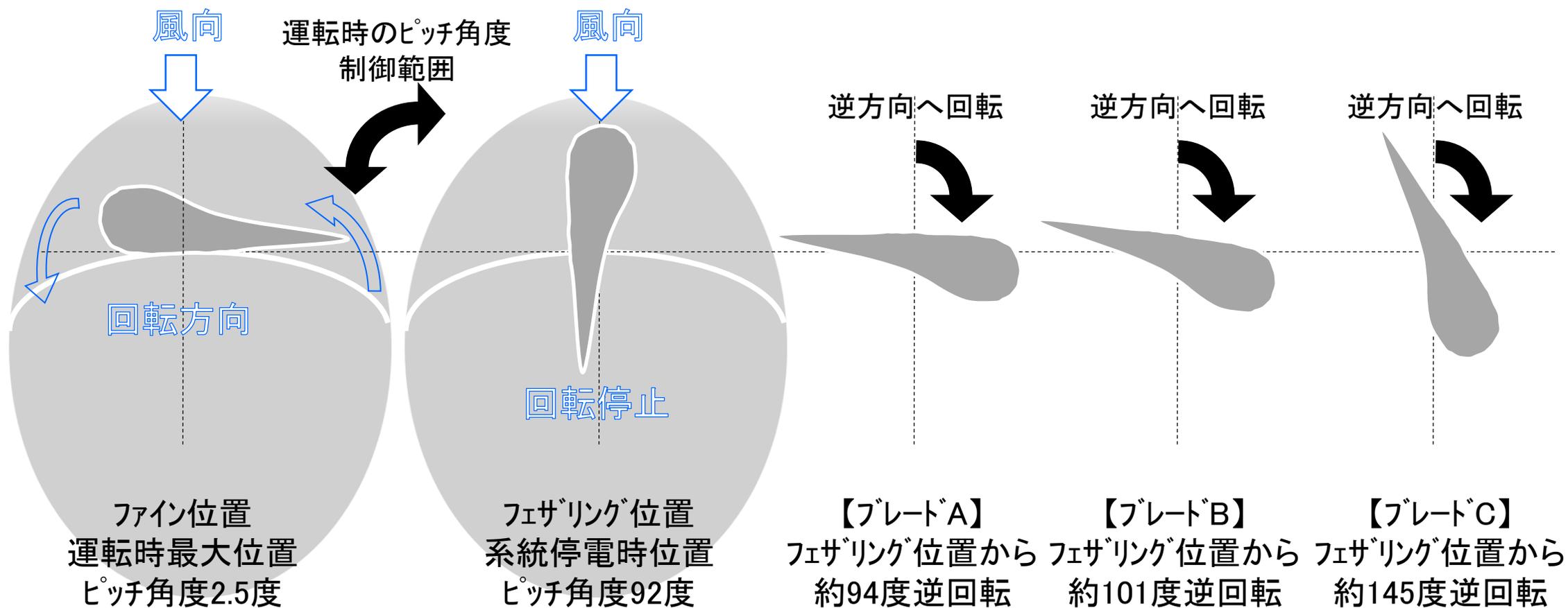


- ピッチモータ；外観上異常なし
- ピッチギア；外観上異常なし
(ギア面すべりなし)

補助資料 3-③

③解体前ブレード点検(2/2)

風車ハブ 側刻印(90度毎)に対するボルト(総数50個)位置に基づく夕-倒壊時のブレード位置

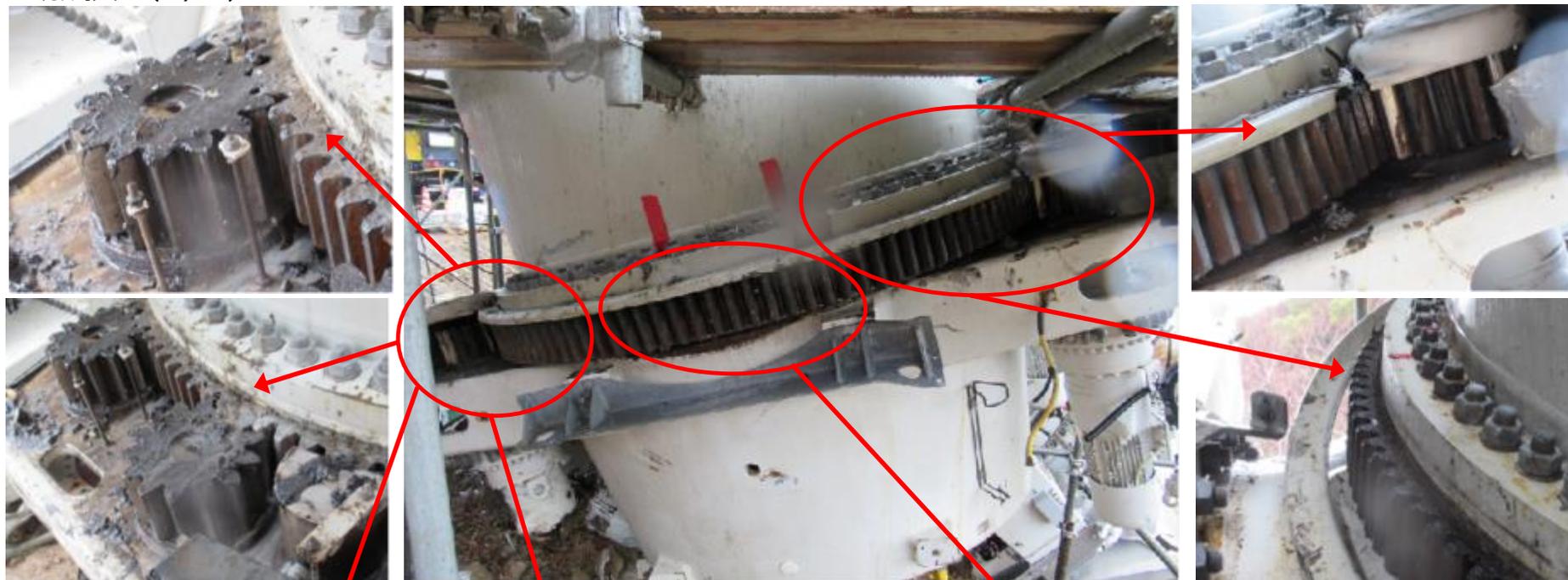


補助資料 3 - ④

④解体中ヨーギア点検 (1/2)



視線



- ・ヨーギア；外觀上異常なし
ギア面すべりなし



補助資料 3 - ④

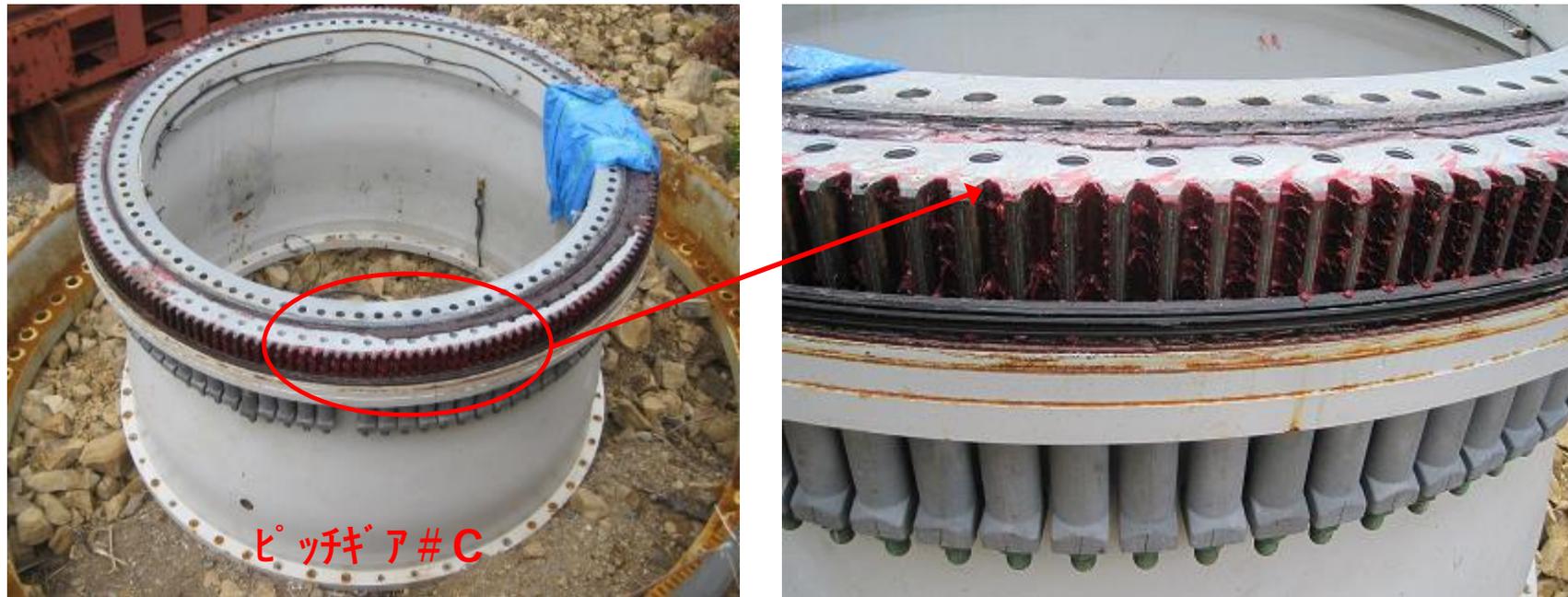
④解体中ヨーギア点検 (2/2)



- ・ヨーギア(全周)；外観上 欠け、キズ、スベリ等の異常なし

補助資料 3-⑤

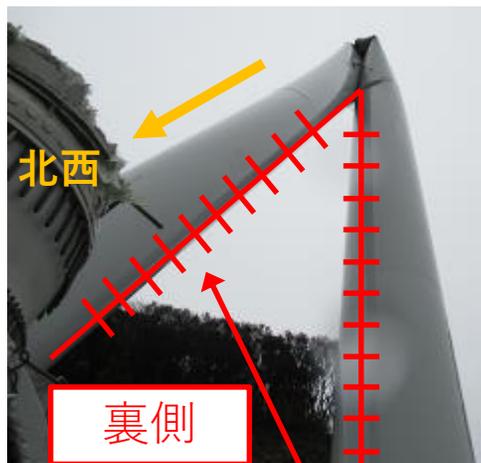
⑤解体中ピッチギア点検



- ・ピッチギア(全周/#A~#C3台)；外観上 欠け、キズ、スベリ等の異常なし

補助資料 3 — ⑥

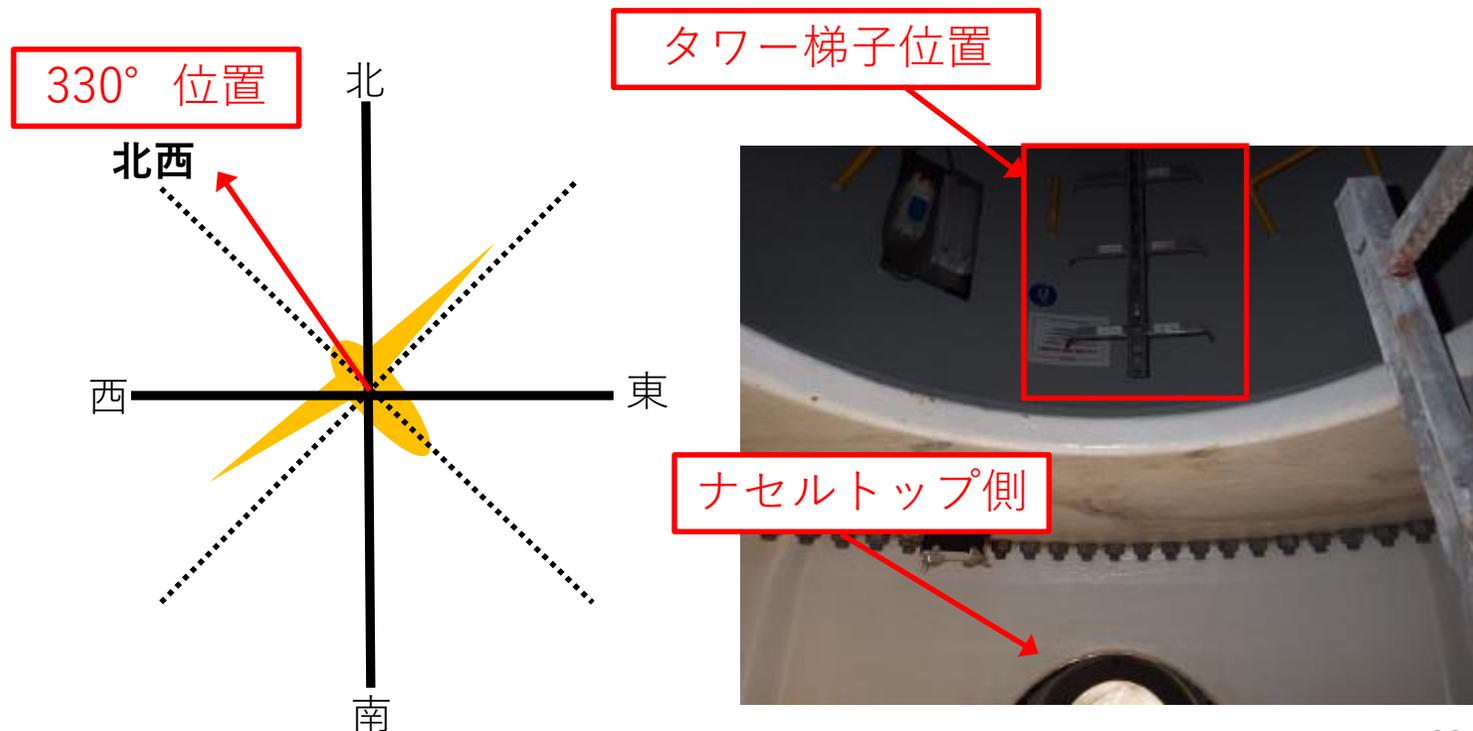
⑥ ナセル方向



< 調査結果 >

- ・ 刃-梯子 ; 北西位置に設置
- ・ 刃- ; 北西側にねじれながら倒壊
- ・ ナセルトップ ; 南西側を向いている

上記の状態から復元させた時のナセルは**330度** (北西方向) である
※ ナセル方向**330度**は刃-梯子設置位置の方角から算出



補助資料 4 - ①

4) 分解点検状況

① ピッチモータ #A 分解点検 (1/2)

ピッチモータ#A分解点検

①モータ／ギア切り離し



②ブレーキユニット取り外し中



開放時：ブレーキ粉多数あり、焼けた臭いあり



電気回路：異常なし

③ブレーキユニット取り外し後



補助資料 4-①

①ピッチモータ #A 分解点検 (2/2)

④固定板取り外し後



⑤ブレーキパッド取り外し後



⑥可動板取り外し後



補助資料 4 - ②

②ヨーマータ分解点検

風車タワー倒壊時のヨーマータの状況



ヨーマータ # 1 ~ # 3

ヨーマータ # 4 ~ # 6



ヨーマータは風車に 6 台設置され、各 3 台（# 1 ~ # 3 および # 4 ~ # 6）がナセルの左右位置に設置される
タワー倒壊時にヨーマータ # 1 ~ # 3 が地面に衝突し損傷した

補助資料 4 - ②

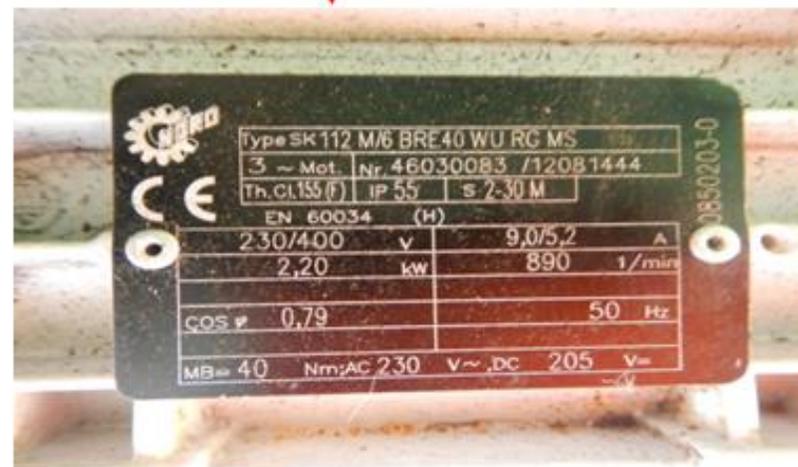
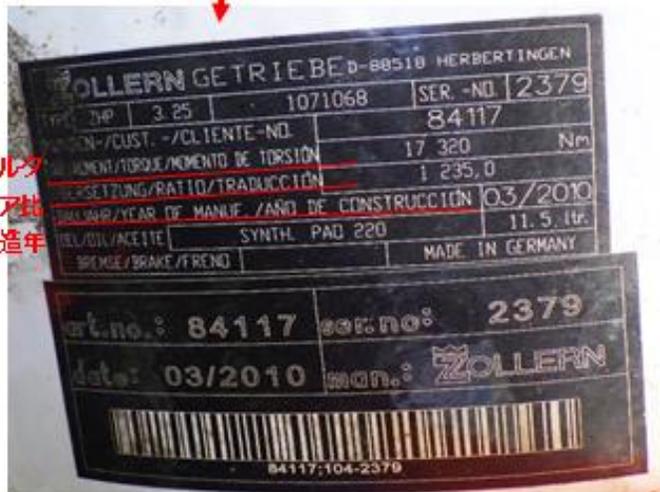
②ヨ一モ一タ #4 分解点検 (1/2)

【#4ヨ一モ一タ分解点検】

①モ一タ/ギア切り離し



トルク
ギア比
製造年



補助資料 4 - ②

②ヨ一モ一タ #4 分解点検 (2/2)



※ブレーキ粉は微量だが、ブレーキパットの摩耗痕、変色あり

補助資料 5

5) 風車タワー鋼材の引張試験及び成分分析結果

一般財団法人ベターリビング筑波建築試験研究センターに依頼し、試験および成分分析を実施した結果を以下に示す。

1. 試験目的

本試験は、アドエコロジー株式会社の試験依頼により、台風による被害をうけた構造物に使用された鋼材の引張試験および化学成分分析を実施し、鋼材の機械的性質および化学成分を確認する事を目的とする。

2. 試験体

試験片は依頼者より提供された試験体から採取した。試験項目一覧を表 2.1 に示す。試験体は台風の被害を受けた風車から切り出した鋼板である。風車概要および台風被害概要を図 2.1~図 2.2 に示す。試験体の採取位置は依頼者によって決定された。試験体採取位置を図 2.3 および図 2.4 に示す。試験体写真を写真 2.1~写真 2.3 に示す。試験体数は 9 体である。試験体寸法は板厚 26mm、幅 150mm、長さ 500mm である。試験体材料識別図を図 2.3 に、試験体ミルシートを図 2.5~図 2.7 に示す。

表 2.1 試験項目一覧

試験項目	試験体 No.	記号の種類	試験体採取方向	試験体寸法(mm)			試験片※1	試験片数
				長さ	幅	厚さ		
引張試験 および 化学成分分析※2	No.1	SM400B※3	圧延方向	500	150	26	1A号	1
	No.2							1
	No.3							1
	No.4		圧延と直行方向					1
	No.5							1
	No.6							1
	No.7							1
	No.8							1
	No.9							1

※1 試験片は JIS Z 2241:2011(金属材料引張試験方法)による

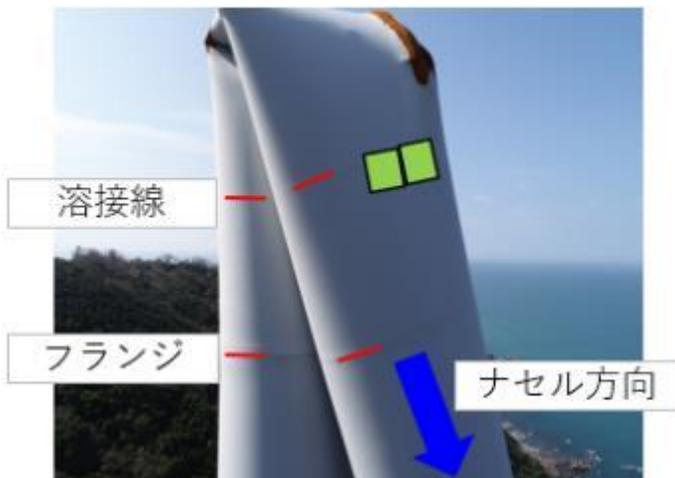
※2 化学成分分析は試験体 No.1 のみ実施した。

※3 JIS G 3106:2015(溶接構造用圧延鋼材)

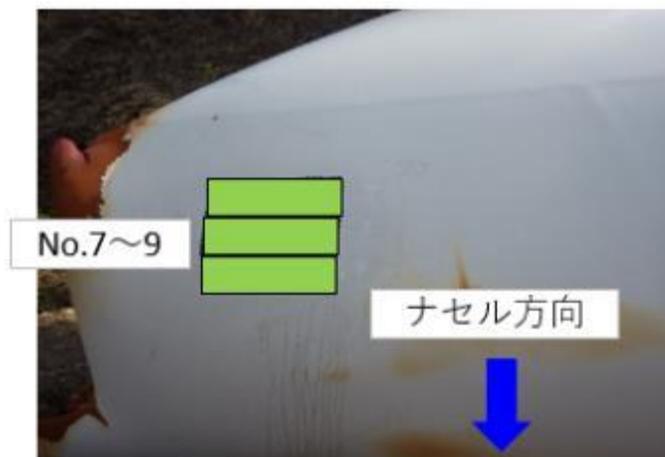
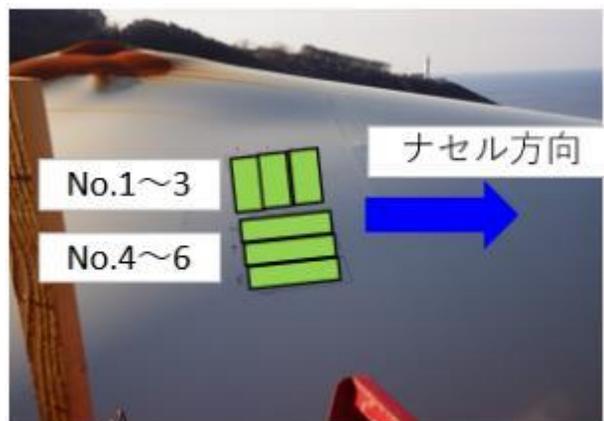
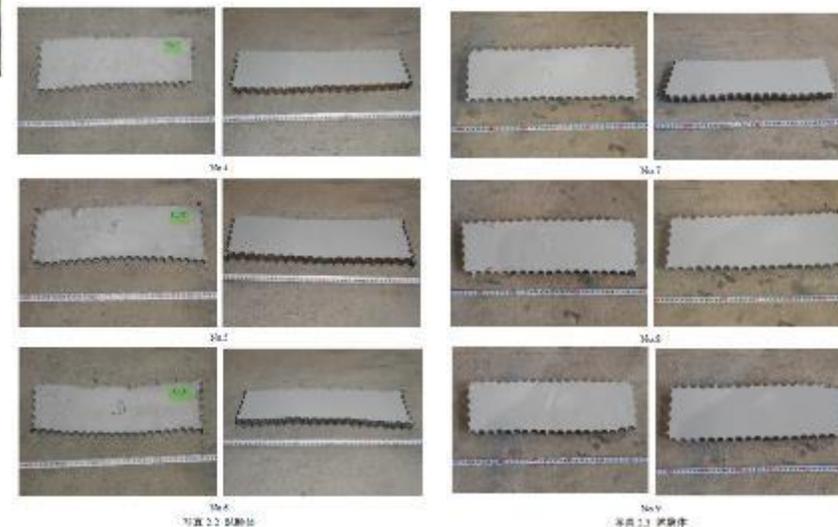
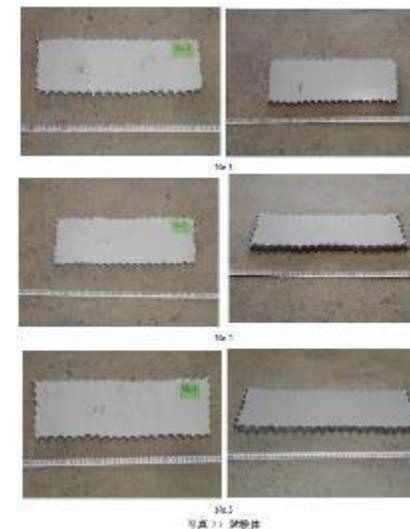
補助資料 5

テストピース採取箇所No. 1～6

- 右側ピースNo.1～3
- 左側ピースNo.4～6



■ テストピース採取箇所No.7～9



補助資料 5

4. 試験結果

4.1 引張試験結果

試験結果一覧を表 4.1 に示す。応力-ひずみ関係を図 4.1 に、試験実施状況を写真 4.1~写真 4.10 に示す。

表 4.1 試験結果一覧(引張試験)

試験片	0.2%耐力 ^{※1} (N/mm ²)	上降伏点 (N/mm ²)	下降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 ^{※2} (%)	破断伸び (%)	破断位置
No.1	277	—	—	450	62	29	A
No.2	273	—	—	449	61	30	A
No.3	272	—	—	452	60	29	A
No.1~No.3 平均	274	—	—	450	61	30	—
ミルシート値	281			439	—	33	—
No.4	—	292	285	447	65	30	A
No.5	—	287	283	450	64	30	A
No.6	—	287	283	449	64	30	A
No.4~No.6 平均	—	289	284	449	64	30	—
ミルシート値	281			439	—	33	—
No.7	—	323	321	472	68	28	A
No.8	—	323	322	468	69	26	A
No.9	—	330	328	474	70	26	A
No.7~No.9 平均	—	326	325	472	69	26	—
ミルシート値	312			478	—	31	—
規格値 (SM400B)	235 以上			400~510	—	22 以上	—

※1 試験体 No.1~No.3 は、明瞭な降伏点を示さなかった。よって耐力は 0.2%オフセット耐力とした。0.2%オフセット耐力を算出するための剛性は規格降伏値(235N/mm²)の 1/3~2/3 倍時のデータを結び算出した。

※2 降伏比は 0.2%オフセット耐力あるいは上降伏耐力を引張強さで除して算出した。

※3 試験体は塗装されており、板厚の実寸法を計測する事ができなかった。よって応力を算出するための断面積は平行部幅の実測値および板厚の公称値を使用し算出した。

4.2 化学成分分析

試験結果一覧を表 4.2 に示す。

表 4.2 試験結果一覧(化学成分分析)(%)

試験片	C	Si	Mn	P	S	Ceq [※]
C-1	0.15	0.26	0.76	0.016	0.004	0.29
規格値	0.20 以下	0.35 以下	0.60~1.50	0.035 以下	0.035 以下	0.44 以下

※炭素当量 Ceq は以下の式で算出した

$$Ceq = C + Si/24 + Mn/6$$

■ 構造設計者による試験結果の考察

タワ一部から抜きとった供試体の強度確認(降伏点、引張強さ)を行った結果、ミルシート記載の値を正として検証結果に使用することとした。