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



- 1. 風力発電所の概要
- 2. 事故概要
- 3. 事故原因の調査
 - (1) 台風モデルによる風況解析
 - (2) タワー座屈の構造解析<静的解析>
 - (3)破損現物調査による品質確認
- 4. 時刻歴応答解析による検証<動的解析>
- 5. タワー座屈の推定原因
- 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	和歌山県日高町大字阿尾字御野脇1990-18	ブレード ナセル
運	転	開始	日	2010年9月(8年稼働)	
風	車	型	式	エネルコン社 E-82 E1	
製	造	メ —	カ	ENERCON社(ドイツ)	82 m
定	格	出	力	1, 990 k W	
\sim		ブ	高	78m	
	_	タ直	径	82m	
風	車 耐	風速丸	見 格	IEC/クラスⅡA	78m
V e	50(3	秒 間 平	均)	59.5m/s	
Vre	f(10分間	 雪平均規準	風速)	42.5m/s	
乱	流	強	度	Α	図1 風車外形図

1. 風力発電所の概要





事故前の風車



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 あった
- 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、風車の座屈を発見。





タワー中間部(約37m付 近)より北西方向へ座屈

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



図 停電時のブレードピッチ動作フロー図





2. 事故概要(4/4)

【日の岬及び周辺の当日の風況状況】



 ・台風通過2時間前からの停電にてSCADAデータが無いため、検討にあたっては 以下の4つのフローにより進めた。

(1) 台風モデルによる	(2)タワー座屈の構造	(3)破損現物調査によ	(4)時刻歴応答解析に
風況解析	解析<静的解析>	る品質確認	よる検証<動的解析>
台風21号による台風 モデルを用いて、上空 の風速と風向を求め、 地形形状を考慮の上、 ハブ高さでの時系列の 風速、風向(10分平均 風速)を求める。	風向4ケースで、2007 年度版の土木学会の指 針に基づき、タワー座 屈の風速を逆算にて求 める。	現地解体作業と並行 して、回収した部材 の破損状況等から風 車実機の性能に問題 が無かったかを確認 する。	ウィンドシアなどを含 めた風況解析結果を用 い、時刻歴応答解析を 製造メーカー(エネル コン社)で実施し、風 車各部の最大応力を求 め、断面照査でタワー 座屈に至るかを検証す る。

3. 事故原因の調査 (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



・ 台風経路図
 2018年9月4日 12時頃に風力発電所に最接近



(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

3. 事故原因の調査 (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}=0.97~1.20
 - 海側に開けた斜面の中腹



3. 事故原因の調査 (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48.1m/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±2*σ*a(注)とすると、<u>41.8~62.6m/s</u>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±20が信頼区間となる



3. 事故原因の調査 (2) タワー座屈の構造計算(静的解析)

2007年度版の土木学会の指針に基づき、ナセルに対する風向ケース毎の座屈に至る10分 平均風速および座屈高さを逆算で算出した。

- ・ブレードはフェザリング、ローターはフリー、ヨー制御は外部電源の停電により制御不能状態とし
 固定された状態とする。
- ・タワーに生じる応力が短期許容応力度に達した時点を座屈と位置付けた。
- ・風荷重の算出に用いるガスト影響係数G_Dは、風車指針に基づきG_D=2.12とする。
- ・ナセルの向きは横風、風向45度、風向33度、風向正面の4ケースとする。

算定結果	横風	風向45度	風向33度	風向正面
設計風速(m/s) 発電機ハブ高さの10分平均風速	63.09	74.26	82.94	178.74
座屈高さ(m)	36.9	36.9	36.9	36.9

・台風モデルでの風況解析による推定最大10分平均風速:<u>52.2m/s</u>
 (推定のバラツキ範囲を2σとすると41.8m/s~<u>62.6m/s</u>)
 ・構造計算によるタワー座屈に至る推定最大10分平均風速:<u>63.09m/s</u>(横風時)

台風モデルでの風況解析 < タワー座屈の構造計算(静的解析)

3. 事故原因の調査 (3) 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・点検を実施した。

1)	ドローンによる座屈状況の確認	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3一①
	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3一③
	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4一①
	②ヨーモータ#4~6分解点検	補助資料4一②
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)破損現物調査による品質確認

確認結果

(*1):O:可能性大、△:可能性あり、×:可能性なし

14

大項目	調査項目	確認内容	確認結果	評価(*1)
	(1)設計強度不良	強度計算書	強度上、最弱部でタワー座屈	×
設計的要因	(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	×
	(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	×
		(1)溶接部非破壊検査(UT)	記録上異常なし	×
製作上の要因	② 波拉签理工具	(2)溶接員の資格および認証	記録上異常なし	×
(吅貝目理)	(3) 浴按官理个民	(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	×
		(1)溶接部非破壊検査(UT)	記録上異常なし	×
	(4) 恢宜个及	(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)破損現物調査による品質確認

(*1): O: 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)
	(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	Δ
	(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	Δ
環境要因	(3)飛来物影響	風車損傷状況、周囲の確認	タワーを座屈させる飛来物なし	×
	(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/タワー座屈後の風車状況確認	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	Δ
	(1)作業不良	過去の点検記録確認	点検記録異常なし	×
保守的要因	(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	×
	(1)トラブル影響	運転中のトラブルによる影響確認	タワー座屈前にトラブル発生なし	×
運転中要因	(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	Δ
	(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)破損現物調査による品質確認

部位別の結果

部位	確認結果	推定	座屈時の状態
ピッチモータ <i>ー/</i> ピッチギア	・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	・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、座屈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、座 屈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、座屈時に回転 (推定)
	・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)
	 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座屈中や地面へ落 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
	・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—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 (3)破損現物調査による品質確認

部位	確認結果	推定	座屈時の状態
ヨーモーター/ ヨーギア	 ・6台中3台はタワー座屈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 	・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	 ・停電直後のナセルは東南東(102度)方向を向いていた ・タワー座屈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) 	 ・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 ・タワー座屈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

3. 事故原因の調査【総括】

(1)事故発生時の台風21号モデルによる風況解析

ハブ高さの推定最大10分平均風速: <u>52.2m/s</u>(推定のバラツキ範囲を2σとすると41.8m/s~<u>62.6m/s</u>)

(2)タワー座屈の構造解析<静的解析>

タワー座屈に至る推定最大10分平均風速:<u>63.09m/s</u>(横風時)、座屈高さ:36.9m

風況解析結果、構造解析<静的解析>結果⇒タワー座屈に至らず

(3)破損現物調査による品質確認(溶接、ブレーキカなど) タワー座屈高さ:36.98m タワーの製造欠陥なし(タワーフランジ部・溶接部で座屈なし、鋼材異常なし) ピッチモータ/ギア、ヨーモータ/ギア異常なし ピッチモータブレーキの滑りあり(3秒平均風速:74m/sで滑り発生(製造メーカ(エネルコン社)見解))

タワー設計・製造上の欠陥なし⇒動的解析で検証

(4) 時刻歴応答解析による検証<動的解析> ウィンドシアなどを含めた風況解析結果を用い、時刻歴応答解析を製造メーカー(エネルコン社)で 実施し、風車各部の最大応力を求め、断面照査でタワー座屈に至ることを解析・評価する



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=52.2m/s, 風向189.8°)

②ナセルは、停止時の102°で固定

③Ve50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 B 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(風向Sの値)

 $Ve50 = V50 \times Gf = 52.2 \times 1.57 = 81.9 m/s$



注:静的解析との比較は、12:20の風条件による解析結果を用いる

動的解析に用いた解析コード

Bladed, DNV-GL

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(V50=52.5m/s、Ve50=81.9m/s)





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)

動的解析と静的解析の解析条件

- 動的解析 : サイト風条件を反映した変動風速による動的応答解析の最大応力を照査
- 静的解析 :風車指針に基づくガスト影響係数を応力に乗じて得られる最大値を照査

ハブ高さ平均風速、ヨー角、ピッチ角は、ほぼ同一条件

	ハブ高	「玄風速	風速ガスト	ガスト影響係数		∃一角		۲w∓
	平均風速	Ve50	Gf	GD	風向①	ナセル方位②	1-2	L 97
	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[deg]	[deg]	[deg]	[-]
表1 動的解析 Bladedによる動的応答解析	52.2	81.9	1.57	_	189.8	102	87.8	フェザリング
表2 静的解析 風車指針に基づく等価静的風荷	重 52.2	_	_	2.12	_	_	90	フェザリング

表 動的解析と静的解析の解析条件

注1:表1,2,3は、P.23からP.26の応力度表

注2:表3は、表1の応力を風速推定のバラツキを考慮した平均風速(62.6m/s)の値に補正した応力

エネルコン社で実施された時刻歴応答解析により求めたタワーに生じた最大応力を用いて断面照査を 実施した。

図1,2に応力度及び検定比の高さ方向部分布図を、表1,2に各解析手法による断面照査結果を示す。表3に風速推定のばらつき+2σを考慮して動的解析を補正した照査結果、表4に時刻歴応答解析の静的解析に対する応力の増加率を示す。

図1_時刻歴応答解析により求めた横風時のタワー応力

図2_静的解析により求めた横風時のタワー応力



時刻歴応答解析では、応力1を越える箇所あり

表1_時刻歴応答解析による断面照査結果

表2_静的解析による断面照査結果

	1	筋占立さ	圧縮	曲げ	せん断	ねじり	許	容応力度:	短期					筋占立さ	圧縮	曲げ	せん断	ねじり	許	容応力度:	短期			
要素部	位	可当日の	応力度	応力度	応力度	応力度	cfcr	sfcr	bfcr	σc/cfcr	τs/sfcr	判定	部位	り目に	応力度	応力度	応力度	応力度	cfcr	sfor	bfcr	$\sigma c/cfcr$	$\tau s/sfcr$	判定
番号	-	Z (m)	σο	σb	τs	τt	(N/mm^2)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	+σb/bfcr	+ t t/sfcr	112		Z (m)	σο	σb	τs	τt	(N/mm^2)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	+σb/bfcr	+τt/sfcr	1.1~
	1111	77.05	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)				0.447	0.400	01/	1 144	77.05	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)				0.000	0.000	01/
17	骊	11.25	1.8/	97.3	13.2	24.59	235.0	88.1	235.0	0.44/	0.429	UK		11.25	1.8/	41.3	8.9	16.62	235.0	88.1	235.0	0.209	0.290	<u>UK</u>
	骗	/4.59	1.5/	100.1	12.7	22.75	235.0	87.5	235.0	0.458	0.405	UK	ト端	74.59	1.51	48.3	8.6	15.38	235.0	87.5	235.0	0.238	0.2/4	UK
	骊	/4.59	9.04	113.2	14.9	25.86	235.0	/9.0	235.0	0.520	0.516	UK	上玩	/4.59	9.04	54. /	10.1	17.48	235.0	/9.0	235.0	0.2/1	0.349	UK
	疝	69.27	8.40	149.3	13.8	22.35	234.9	/8.0	235.0	0.6/1	0.464	UK	ト端	69.27	8.40	83.1	9.4	15.11	234.9	/8.0	235.0	0.390	0.314	
15	骊	69.27	9.6/	163.8	15.6	24.59	232.4	10.1	234. /	0.740	0.569	UK	.上玩.	69.27	9.6/	91.2	10. /	16.62	232.4	/0./	234. /	0.430	0.386	<u>UK</u>
<u>下</u>	端	63.95	9.03	205.1	14.6	21.4/	230.5	/0.0	233.2	0.919	0.515	OK	下端	63.95	9.03	120.9	10.0	14.51	230.5	/0.0	233.2	0.558	0.350	OK
14 上	端	63.95	8.89	187.0	13.8	19.52	233.2	11.3	235.0	0.834	0.431	OK	上端	63.95	8.89	110.2	9.6	13.19	233.2	11.3	235.0	0.50/	0.295	<u>0K</u>
<u>下</u>	端	55.97	8.08	231.6	12.5	16.16	230.5	//.0	233.2	1.028	0.3/3	NG	下端	55.97	8.08	142.0	8. /	10.92	230.5	//.0	233.2	0.644	0.255	OK
13 上	端	55.97	7.66	212.8	11.7	14.81	233.0	83.0	235.0	0.938	0.319	OK	上端	55.97	7.66	130.5	8.2	10.01	233.0	83.0	235.0	0. 588	0.219	<u> </u>
	端	53.25	7.43	223.7	11.3	13.95	232.1	83.1	234. 5	0.986	0.304	OK	下端	53.25	7.43	138.6	7.9	9.43	232.1	83.1	234.5	0.623	0.209	OK
12 上	端	53.25	8.13	223.7	11.7	13.95	232.1	83.1	234. 5	0.989	0.308	OK	上端	53.25	8.13	138.6	8.4	9.43	232.1	83.1	234.5	0.626	0.214	OK
· ¹² 下	端	45.08	7.46	249.2	10.7	11.77	229.7	84.1	232.5	1.104	0.267	NG	下端	45.08	7.46	158.4	7.7	7.96	229.7	84.1	232.5	0.714	0.186	OK
	端	45.08	7.57	230.5	10.2	10.87	232.0	89.2	234.4	1.016	0.237	NG	上端	45.08	7.57	146.5	7.5	7.35	232.0	89.2	234.4	0.658	0.166	OK
「 「 下	端	36.90	6.99	245.7	9.4	9.29	229.7	91.1	232.6	1.087	0.206	NG	下端	36.90	6.99	160.0	6.9	6.28	229.7	91.1	232.6	0.718	0.145	OK
10 上	端	36.90	6.54	213.7	8.4	8.05	233.8	98.9	235.0	0.937	0.167	OK	上端	36.90	6.54	139.2	6.2	5.44	233.8	98.9	235.0	0.620	0.118	OK
10 下:	端	31.45	6.22	219.8	8.0	7.30	232.4	100.6	234.7	0.963	0.152	OK	下端	31.45	6.22	145.2	5.9	4.94	232.4	100.6	234.7	0.646	0.108	OK
ο L	端	31.45	6.79	219.8	8.2	7.30	232.4	100.6	234. 7	0.966	0.154	OK	上端	31.45	6.79	145.2	6.2	4.94	232.4	100.6	234.7	0.648	0.110	OK
y ۲	端	24.95	6.40	224. 1	7.7	6.51	230.8	103.3	233.4	0.988	0.138	OK	下端	24.95	6.40	150.4	5.8	4.40	230.8	103.3	233.4	0.672	0.099	OK
。上	端	24.95	6.93	224.1	7.8	6.51	230.8	103.3	233.4	0.990	0.139	0K	上端	24.95	6.93	150.4	6.0	4.40	230.8	103.3	233.4	0.674	0.101	0K
° 下	端	18.45	6.56	226.4	7.4	5.84	229.2	107.1	232. 2	1.004	0.124	NG	下端	18.45	6.56	154.5	5.7	3.95	229.2	107.1	232.2	0.694	0.090	OK
,上	端	18.45	6.36	212.6	7.0	5.47	231.1	109.8	233.7	0.937	0.113	0K	上端	18.45	6.36	145.1	5.4	3.70	231.1	109.8	233.7	0.648	0.083	0K
/ 下	端	15.85	6.23	213.1	6.8	5.25	230.5	111.6	233. 2	0.941	0.108	OK	下端	15.85	6.23	146.3	5.3	3.55	230.5	111.6	233.2	0.655	0.080	OK
a L'	端	15.85	6.47	213.1	6.9	5.25	230.5	111.6	233.2	0.942	0.109	OK	上端	15.85	6.47	146.3	5.4	3.55	230.5	111.6	233.2	0.656	0.080	OK
⁶ 下	端	13.25	6.34	213.5	6.7	5.04	229.9	113.8	232.7	0.945	0.103	OK	下端	13.25	6.34	147.5	5.3	3.40	229.9	113.8	232.7	0.661	0.076	OK
_ <u></u> _ <u></u> _'	端	13.25	6.62	213.5	6.7	5.04	229.9	113.8	232.7	0.946	0.104	OK	上端	13.25	6.62	147.5	5.4	3.40	229.9	113.8	232.7	0.663	0.077	OK
⁵ آ	端	10.33	6.46	213.3	6.6	4.80	229.2	116.7	232.1	0.947	0.098	OK	下端	10.33	6.46	148.4	5.2	3.25	229.2	116.7	232.1	0.667	0.073	OK
L E	端	10.33	5.17	163.7	5.0	3.66	215.0	115.4	215.0	0.786	0.075	OK	上端	10.33	5.17	113.9	4.1	2.47	215.0	115.4	215.0	0.554	0.057	0K
4 下	端	7.56	5.05	163.3	4.9	3.50	215.0	117.7	215.0	0.783	0.072	OK	下端	7.56	5.05	114.4	4.0	2.37	215.0	117.7	215.0	0.555	0.054	OK
<u>。</u> 上'	端	7.56	4.54	132.9	4.0	2.83	215.0	121.3	215.0	0.639	0.056	0K	上端	7.56	4.54	93.1	3.3	1.91	215.0	121.3	215.0	0.454	0.043	0K
3 下	端	2.00	4.35	132.1	3.8	2.60	215.0	124.1	215.0	0.635	0.052	OK	下端	2.00	4.35	93.7	3.1	1.76	215.0	124.1	215.0	0.456	0.040	OK
<u> </u>	端	2.00	5.13	151.9	4.4	3.00	215.0	124.1	215.0	0.730	0.060	0K	上端	2.00	5.13	107.7	3.6	2.03	215.0	124.1	215.0	0.525	0.046	OK
2	端	0.90	5.08	151.7	4.4	2.95	215.0	124.1	215.0	0.729	0.059	OK	下端	0.90	5.08	107.8	3.6	2.00	215.0	124.1	215.0	0.525	0.045	OK
	端	0.90	5.17	151.7	4.4	2.95	215.0	124.1	215.0	0.730	0.059	OK	上端	0.90	5.17	107.8	3.6	2.00	215.0	124.1	215.0	0.525	0.045	OK
「 下	端	0.15	5.07	147.3	4.3	2.84	215.0	124.1	215.0	0.709	0.058	OK	下端	0.15	5.07	104.8	3.6	1.92	215.0	124.1	215.0	0.511	0.044	OK
										MAX=	1.104											MAX=	0.718	

24

		筋占高さ	圧縮	曲げ	せん断	ねじり	許	容応力度:	短期			
要素	部位		応力度	応力度	応力度	応力度	cfcr	sfcr	bfcr	σc/cfcr	τs/sfcr	判定
一番号		Z (m)	0°C (N /mm ²)	0 D (N /mm ²)	T S	ττ (N (mm ²)	(N/mm^2)	(kN/m^2)	(kN/m²)	+ σ b/btcr	+ t t/stcr	
	トが半	77 25	(N/IIII) 7 87	130 0		(N/IIII) 50.84	235 0	88 1	235 0	0 620	0 702	OK
17		71 50	7.07	1/3 0	19.0	47 05	235.0	87 5	235.0	0.023	0.732	
-	上端	74.59	9.0/	162.8	21 /	53 17	235.0	70 0	235.0	0.044	0.740	OK
16		60 27	8 10	21/ 7	10 0	16 22	230.0	78.0	235 0	0. 7.01	0.940	OK
	上端	69 27	9.67	235 6	22 5	50 84	232 4	70.0	234 7	1 045	1 037	NG
15	. <u></u>	63 95	9 03	295 0	21 0	44 39	230 5	70.0	233 2	1 304	0 934	NG
	上端	63 95	8 89	268 8	19.8	40 35	233 2	77.3	235 0	1 182	0 778	NG
14	下端	55 97	8 08	333 0	18 0	33 41	230 5	77 0	233 2	1 463	0 668	NG
	上端	55.97	7.66	306.0	16.8	30, 63	233.0	83.0	235.0	1.335	0.571	NG
13	下端	53.25	7.43	321.7	16.3	28.84	232.1	83.1	234.5	1.404	0.543	NG
10	上端	53.25	8.13	321.7	16.8	28.84	232.1	83.1	234.5	1.407	0.549	NG
12	下端	45.08	7.46	358.3	15.4	24.34	229.7	84.1	232.5	1.573	0.472	NG
11	上端	45.08	7.57	331.4	14.7	22.47	232.0	89.2	234.4	1.447	0.417	NG
	下端	36.90	6.99	353.2	13.6	19.22	229.7	91.1	232.6	1.549	0.360	NG
10	上端	36.90	6.54	307.3	12.1	16.65	233.8	98.9	235.0	1.336	0.291	NG
10	下端	31.45	6. 22	316.1	11.5	15.10	232.4	100.6	234.7	1.373	0.265	NG
0	上端	31.45	6.79	316.1	11.7	15.10	232.4	100.6	234.7	1.376	0.267	NG
9	下端	24.95	6.40	322.3	11.1	13.45	230.8	103.3	233.4	1.408	0.237	NG
0	上端	24.95	6.93	322.3	11.3	13.45	230.8	103.3	233.4	1.411	0.239	NG
0	下端	18.45	6.56	325.6	10.7	12.07	229.2	107.1	232.2	1.431	0.212	NG
7	上端	18.45	6.36	305.7	10.0	11.32	231.1	109.8	233.7	1.336	0.195	NG
'	下端	15.85	6.23	306.5	9.8	10.85	230.5	111.6	233.2	1.341	0.185	NG
6	上端	15.85	6.47	306.5	9.9	10.85	230.5	111.6	233.2	1.342	0.186	NG
0	下端	13.25	6.34	307.0	9.7	10.41	229.9	113.8	232.7	1.347	0.177	NG
5	上端	13.25	6.62	307.0	9.7	10.41	229.9	113.8	232.7	1.348	0.177	NG
	下端	10.33	6.46	306.7	9.5	9.93	229.2	116.7	232.1	1.349	0.166	NG
4	上端	10.33	5.17	235.5	7.3	7.57	215.0	115.4	215.0	1.119	0.128	NG
-	下端	7.56	5.05	234.9	7.1	7.24	215.0	117.7	215.0	1.116	0.122	NG
3	上端	7.56	4.54	191.1	5.8	5.85	215.0	121.3	215.0	0.910	0.096	OK
Ŭ	下端	2.00	4.35	190.0	5.5	5.37	215.0	124.1	215.0	0.904	0.088	OK
2	上端	2.00	5.13	218.4	6.4	6.21	215.0	124.1	215.0	1.040	0.101	NG
	下端	0.90	5.08	218.1	6.3	6.11	215.0	124.1	215.0	1.038	0.100	NG
1	上端	0.90	5.17	218.1	6.3	6.11	215.0	124.1	215.0	1.039	0.100	NG
	下端	0.15	5.07	211.8	6.2	5.88	215.0	124.1	215.0	1.009	0.097	NG
										MAX=	1.573	

表3_風速推定のばらつき+2σを考慮して補正した時刻歴応答解析 表4_「時刻歴応答解析による応力」/「静解析による応力」の倍率

要素 番号	部位	節点高さ Z(m)	ねじりモー メント倍率	曲げモーメ ント倍率	せん断力倍 率
17	上端	77.25	1.48	2.36	1.48
17	下端	74.59	1.48	2.07	1.48
16	上端	74.59	1.48	2.07	1.48
10	下端	69.27	1.48	1.80	1.48
15	上端	69.27	1.48	1.80	1.46
15	下端	63.95	1.48	1.70	1.46
1/	上端	63.95	1.48	1.70	1.43
	下端	55.97	1.48	1.63	1.43
12	上端	55.97	1.48	1.63	1.43
15	下端	53.25	1.48	1.61	1.43
10	上端	53.25	1.48	1.61	1.39
12	下端	45.08	1.48	1.57	1.39
11	上端	45.08	1.48	1.57	1.36
	下端	36.90	1.48	1.54	1.36
10	上端	36.90	1.48	1.54	1.35
10	下端	31.45	1.48	1.51	1.35
0	上端	31.45	1.48	1.51	1.32
9	下端	24.95	1.48	1.49	1.32
0	上端	24.95	1.48	1.49	1.29
0	下端	18.45	1.48	1.47	1.29
7	上端	18.45	1.48	1.47	1.28
1	下端	15.85	1.48	1.46	1.28
6	上端	15.85	1.48	1.46	1.27
0	下端	13.25	1.48	1.45	1.27
5	上端	13.25	1.48	1.45	1.26
J	下端	10.33	1.48	1.44	1.26
1	上端	10.33	1. 48	1.44	1.24
4	下端	7.56	1.48	1.43	1.24
2	上端	7.56	1.48	1.43	1.22
0	下端	2.00	1.48	1.41	1.22
2	上端	2.00	1.48	1.41	1.21
۷	下端	0.90	1.48	1.41	1.21
1	上端	0.90	1.48	1.41	1.21
	下端	0.15	1.48	1.40	1.21

本件構造設計者の見解

■図1,2より、時刻歴応答解析及び静的解析において最大応力度比となる高さは、概ね 36.9mであり、現地での座屈部の高さの測定結果に概ね一致する。

時刻歴応答解析においては複数の箇所で検定比1を超える。各部位の最大応力発生時刻は 必ずしも一致しないことを考えると、静的解析とも一致する高さを損傷部位と判断できる。

■表4に示すように、時刻歴応答解析による応力/静的解析による応力の値は、概ね1.4~ 2.36にて分布しているが、原設計にて検定比が元々厳しかった高さ36.9m付近では、ねじれ1.48 倍、曲げモーメント1.54倍、せん断力1.35倍であり、時刻歴応答解析による動的効果により、静 的解析より見積もった応力よりかなり大きな応力となり、想定外の風荷重が倒壊に至る主要因 であることが確認できる。

■台風シミュレーション+MASCOT解析により求める風速には推定値のばらつきが計算結果に含まれるため、信頼区間の±2σの上限値を取りハブ高さの風速が62.6m/s(10分平均)とし、風速の2乗に応力値が比例するとして補正した時刻歴応答解析結果による断面照査を行った(表3)。曲げモーメントに対しては各解析点において1を超える値となり、現地での座屈高さである36.9mでは検定比が1.549となる。明らかに座屈する応力となるため、原因は想定外の風が吹いたと推定される。

5.タワー座屈の推定原因

台風21号による午前10時30分の停電にて、ヨー制御停止・フェザリン グ状態で固定する中、台風の移動に伴い風向・風速が変わり、12時 20分前後に、本風車の耐風速(Ve50=59.5m/s)を上回る81.9m/s(3秒 平均風速)の強風が発生。横風の形で受けたことでタワーに過大な応 力が発生して、座屈に至ったものと推定する。

座屈は2段階で生じており、ナセル自重が加わった2段目の座屈時の 衝撃でヨーモータブレーキが滑り、ナセル向きが回転したものと推定 する。



6. 再発防止について

本件の原因究明に時間を要した理由

- 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、 風況シュミ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。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はなく、日本のメーカープロマネへの情報共有を実施し、多方面で意思疎通を図っていく

※ドローン調査、3次元測量は有効



1) ドローンによる座屈状況の確認



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









溶接線の位置







32



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	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	 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	・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3-①

3) 現地点検状況

①解体前タワー内部点検





- ・溶接線2より上部で座屈
- (ドローン計測結果と一致)
- ・タワー接続フランジでは座屈していない







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;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)





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)位置に基づくタワー座屈時のブレード位置





④解体中ヨーギア点検(1/2)





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



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



⑥ナセル方向



<調査結果>

- ・タワー梯子;北西位置に設置
- ・タワ- ;北西側にねじれながら座屈
- ・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度はタワー梯子設置位置の方角から算出







4) 分解点検状況 ①ピッチモータ#A 分解点検(1/2) ビッチモータ#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



電気回路:異常なし ③ブレーキユニット取り外し後



開放時:ブレーキ粉多数あり、焼けた臭いあり



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ブレーキバット取り外し後





⑥可動板取り外し後







②ヨーモータ分解点検

風車タワー座屈時のヨーモータの状況



 $3 - \tau - \varphi \# 1 \sim \# 3$ $3 - \tau - \varphi \# 4 \sim \# 6$

ヨーモータは風車に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 タワー座屈時にヨーモータ#1~#3が地面に衝突し損傷した



②ヨーモータ#4 分解点検(1/2)

【#4ヨーモータ分解点検】 ①モータ/ギア切り離し









②ヨーモータ#4 分解点検(2/2)

②モータ分解前



③カバー取り外し後

⑥固定板取り外し後



③フィン取り外し後



⑤ブレーキユニット取り外し後











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

ー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.試驗目的

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。

		+	1					
試験項目	試験体	記号の	試験体	試験体寸法(mm)		(mm)	1※나나 Am 4年	試験
	No.	種類	採取方向	長さ	幅	厚さ	PC-20天 /1	片数
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

表 2.1 試験項目一覧

※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)



テストピース採取箇所№ 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№.7~9























補助資料5

4.試驗結果

4.1 引張試驗結果

に示す。

		24 112 1 14	source and	The second second		-	
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/mm²)	降伏比 ^{※2} (%)	破断 伸び (%)	破断 位置
No.1	277	-	_	450	62	29	Α
No.2	273	-	_	449	61	30	Α
No.3	272	-	-	452	60	29	Α
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	Α
No.5	_	287	283	450	64	30	Α
No.6	-	287	283	449	64	30	Α
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	Α
No.9	-	330	328	474	70	26	Α
No.7~No.9 平均	_	326	325	472	69	26	Ι
ミルシート値		312		478	-	31	-
規格值 (SM400B)		235 以上		400~510	-	22 以上	-

表41 試驗結果一階(引張試驗)

※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

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. 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。よって広力を算出する

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 試驗結果一覧(化学成分分析)(%)

試験片	С	Si	Mn	Р	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 Ceg は以下の式で算出した

Ceg =C+Si/24+Mn/6

■構造設計者による試験結果の考察

引張強度についてはミルシートに示された数値の誤差範囲であ る。ひずみ硬化がみられるロッドは風車倒壊後、ナセル等の落 下に伴い強制変位を受け引張降伏したものと推定される。 化学成分については精錬後のため試験方法が異なるため細か い数字は異なるがJIS範囲内にて推移しておりJIS相当と判断 できる。