

平成 16 年 11 月 30 日
沖縄電力株式会社

宮古島の風力発電設備被害の調査結果について

当社はこのたび、2003 年 9 月の台風 14 号による宮古島の風力発電設備被害の原因を究明し、今後の風力発電設備の技術開発等の発展のために調査結果を公開しましたのでお知らせいたします。

2003 年 9 月 11 日に宮古島を直撃した台風 14 号は、過去 30 年間で最大級の台風となり、人的被害を始め、家屋、ライフライン、公共施設および農作物等へ大きな被害をもたらしました。

当社でも配電設備を中心とした電力設備、および新エネ設備、とりわけ風力発電設備がこの台風により倒壊や破損等、これまで全国大でも経験のない被害を受けました。風力発電設備は元来、風況条件の良い地点に建設されるものであり、台風を考慮した設計を行ってきました。しかしながら、今回の台風による風力発電設備の倒壊等の被害状況は、「猛烈な台風」のすさまじいまでの破壊力をまざまざと見せつけるものでありました。

原因究明のアプローチとして、学識者・専門家を含めた「風車倒壊等事故調査委員会」並びに「同ワーキンググループ」を設置し、倒壊破損時の「風の評価」と「構造解析と倒壊メカニズムの解明」を行いました。その結果、台風 14 号が通過した際の風力発電サイトでの最大風速は気象台で観測された最大風速 38.4m/s より約 1.5 倍も大きく、60m/s に達し、また、最大瞬間風速は 90m/s に達したことがわかりました。一方、構造解析の結果、タワーや基礎の限界耐力を超える応力が作用したため、タワーの座屈や基礎の破壊に至ったことが判明いたしました。

今回の調査結果を踏まえて、風力発電設備設置地点毎に設計風速を定めて強度計算等を行うこと等を基本的な考え方とし、これに基づき対応を図っていきます。詳細については、風力発電設備ごとに個別に検討し、必要があればタワーや基礎の補強、制御用電源のバックアップ機能付加等の対応を図っていきます。

なお、調査結果は当社ホームページにて公開しております。そちらもご参照ください。

当社ホームページ <http://www.okiden.co.jp/>

以上

1. 被害の概要

平成15年9月11日に宮古島を直撃した台風14号は、過去30年間で最大級の台風となり、人的被害を始め、家屋、ライフライン、公共施設および農作物等へ大きな被害をもたらした。また、当社が保有する6機(2,900kW)の風力発電設備は、3基が倒壊、2基がブレード破損、1基がナセル損傷等の被害を受けた。図1-1に宮古島の風力発電設備の位置、図1-2に風力発電設備の各部位の名称ならびに制御方式を、表1-1に当社が宮古島へ設置したすべての風力発電設備の被害状況一覧を示す。

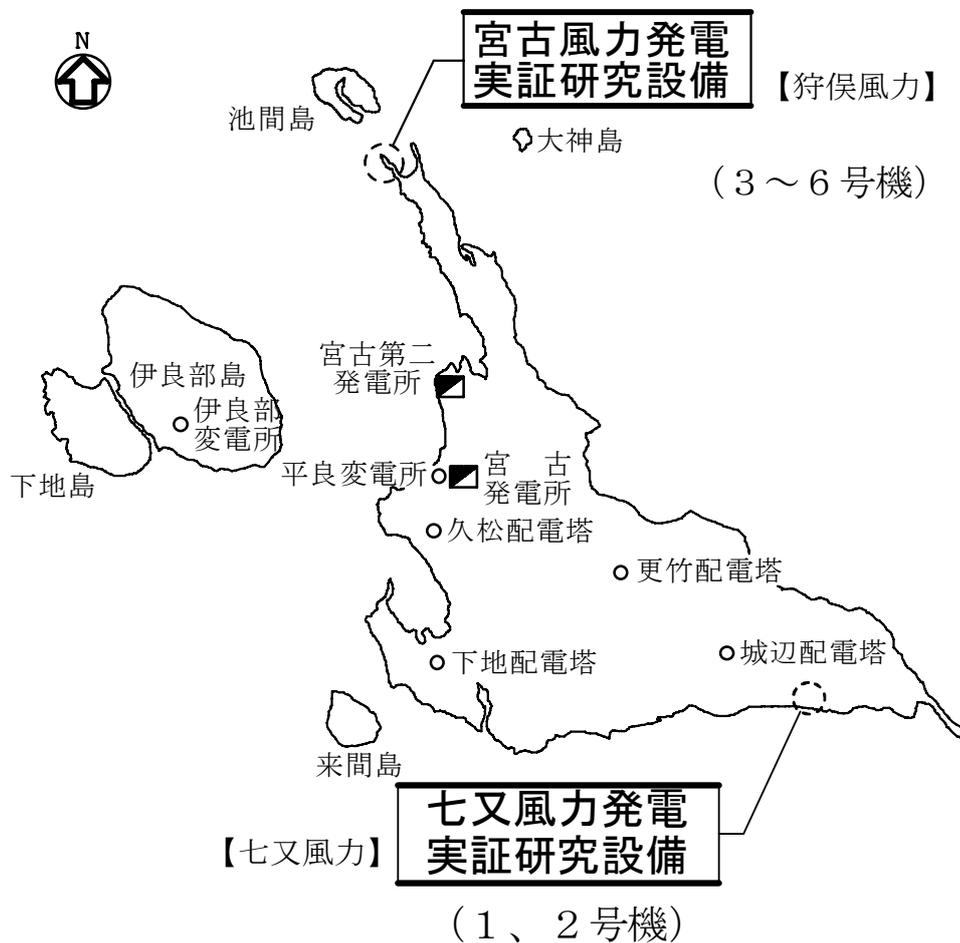
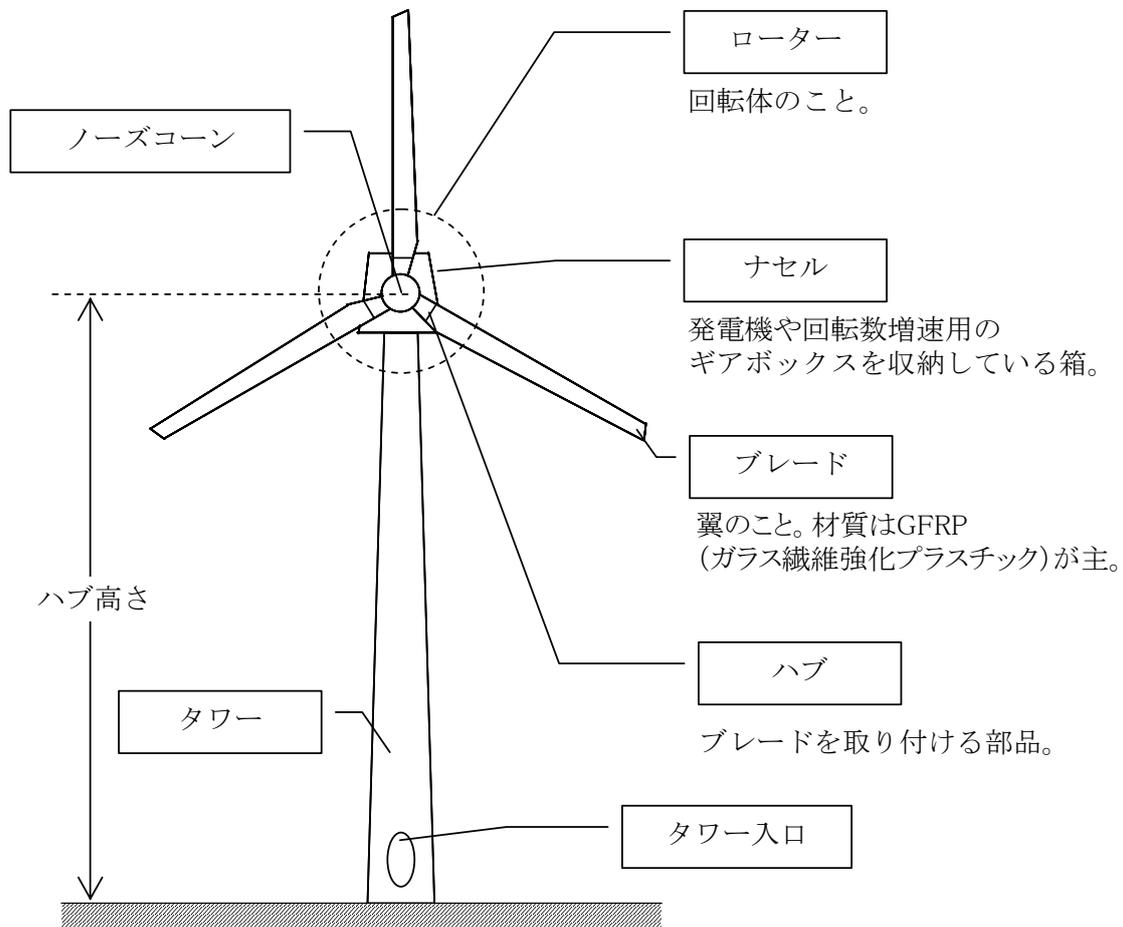
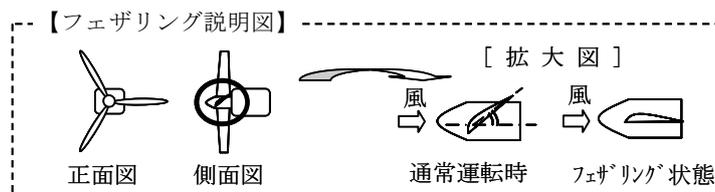


図1-1 風力発電設備の位置



(a). 風車各部位の名称

- ストール制御** 固定翼でブレードの失速(ストール)特性を利用した出力制御方式。停止時には、風向に対してナセル方向を垂直にすることで風を逃がす。
- ピッチ制御** 可変翼で、ブレードの角度を変化させ出力を制御する方式。停止時には、風向に対して正対し、ブレードの角度を水平にすることで風を逃がす (フェザリング・下図参照)。



(b). 風車の制御方式

図 1-2 風力発電設備の各部位の名称ならびに制御方式

表 1-1 台風 14 号による風力発電設備の被害状況一覧

施設名	狩 俣 風 力				七 又 風 力		
	3 号機	4 号機	5 号機	6 号機	1 号機	2 号機	
ユニット番号	3 号機	4 号機	5 号機	6 号機	1 号機	2 号機	
製造メーカー/国名	ミーコン/デンマーク	ミーコン/デンマーク	ミーコン/デンマーク	エネルコン/ドイツ	エネルコン/ドイツ	バスタス/デンマーク	
使用開始年月日	H7.12.5	H7.12.5	H7.12.5	H15.3.31	H10.8.28	H10.8.28	
定格出力	400/100 kW	400/100 kW	400/100 kW	600 kW	500 kW	600 kW	
定格/起動/停止風速	15/3/25 m/s	15/3/25 m/s	15/3/25 m/s	13.5/2/25 m/s	14/2.5/25 m/s	14/4.5/25 m/s	
出力制御方式	ストール制御	ストール制御	ストール制御	ピッチ制御	ピッチ制御	ピッチ制御	
ブレード枚数	3 枚	3 枚	3 枚	3 枚	3 枚	3 枚	
ブレード直径	31m	31m	31m	44m	40.3m	42m	
ローター回転数	36 rpm	36 rpm	36 rpm	18~34 rpm	18~38 rpm	30 rpm	
ハブ高さ	36m	36m	36m	46m	44m	35m	
1.周辺地域への被害	倒壊により道路封鎖	なし	倒壊により道路封鎖	なし	なし	なし	
2.設備被害状況	①ブレードの状態	ブレードは 3 枚ともハブに装着。倒壊時の衝撃により破損し、破片が周囲に飛散。	ブレードは 3 枚ともハブに装着。外観上、異常は認められない。	ブレードは 3 枚ともハブに装着。倒壊時の衝撃により破損し、破片が周囲に飛散。	ブレードは 3 枚とも折損。2 枚が根元から折損飛散。1 枚は先端部分が折損し、南西方向約 90m に落下。	タワー倒壊時、太陽光発電設備と衝突、破損。破片が周囲に飛散しているが、ブレードは 3 枚ともハブに装着。	すべてのブレード表面の GFRP が剥離。ブレードは 2 枚が折損。1 枚は原型は残っているが外装部は全て飛散。
	②ナセルの状態	タワー転倒により破損。発電機脱落。ギアボックス破損。	ノーズコーン飛散。ナセルカバーが全開状態。ナセル内はゆがみが発生。	タワー転倒により破損。発電機脱落。ギアボックス破損。	ナセルカバーに多数の割れが認められる。また、航空障害灯も取付台ごと脱落し、南方向に落下。	倒壊時にタワーから抜けて落下。ナセルはFRPカバーが破損し、発電機部分が露出。	ナセルカバーに多数の割れが認められる。風向風速計も取付台ごと飛散。
	③タワーの状態	倒壊 (10 日 23 時から 11 日 4 時頃の間) 入口扉上部で南西側の道路へ座屈倒壊。	倒壊なし。 外観上、異常は認められない。タワー内部の南側面で水平方向の線状の模様が発生している。	倒壊 (10 日 23 時から 11 日 4 時頃の間) 入口扉上部で南南西側の道路へ座屈倒壊。	倒壊なし。 タワー北東側に損傷ブレードによるものと見られる擦過痕があるが、その他外観上異常は認められない。	倒壊 (10 日 21 時から 11 日 4 時頃の間) アンカーボルト並びにアンカーリングごと基礎コンクリートから抜け、タワーが南側（太陽光発電設備側）に脱壊。	倒壊なし。 タワー外観にブレードの擦過痕があるが、その他外観上異常は認められない。タワー内梯子取付座折損。
	④基礎の状態	基礎上部コンクリートに微小クラックがある。基礎周辺地面の盛り上がりや地割れ等なし。	基礎上部コンクリートに微小クラックがある。基礎周辺地面の盛り上がりや地割れ等なし。	基礎上部コンクリートに微小クラックがある。基礎周辺地面の盛り上がりや地割れ等なし。	外観上、異常は認められない。基礎周辺地面の盛り上がりや地割れ等なし。	基礎上部コンクリートは破壊。主筋に切筋は無いが倒壊の衝撃で屈折。北側の主筋はタワー倒壊時に押された様子で屈折。	外観上、異常は認められない。基礎周辺の砂利が東南から北西（反時計廻り）に幅 70~170cm、深さ約 10~20 cm の窪みが認められる。
3.現場写真	 撮影日：2003.9.12	 撮影日：2003.9.16	 撮影日：2003.9.14	 撮影日：2003.9.14	 撮影日：2003.9.12	 撮影日：2003.9.13	
	 撮影日：2003.9.12	 撮影日：2003.9.15	 撮影日：2003.9.12	 撮影日：2003.9.15	 撮影日：2003.9.12	 撮影日：2003.9.13	

2. 事故調査結果

学識者・専門家を含めた「風車倒壊等事故調査委員会」並びに「同ワーキンググループ」を設置し、数ヶ月以上にわたり専門機関による調査を行い倒壊原因の究明を行った。

図 2-1 に倒壊原因究明のフローを示す。以下の a～d を解析することにより、倒壊メカニズムを解析した。

- 現場の被害状況は、どうだったか（現場状況調査：現状記録・測量調査）
- 風力発電サイトではどれくらいの風が吹いたのか（風の評価：風洞実験・気流解析）
- タワー・基礎の限界耐力はどれくらいか（強度の評価：FEM 解析）
- 風力発電設備に作用した風荷重はどれくらいか（風荷重の評価：風応答解析）

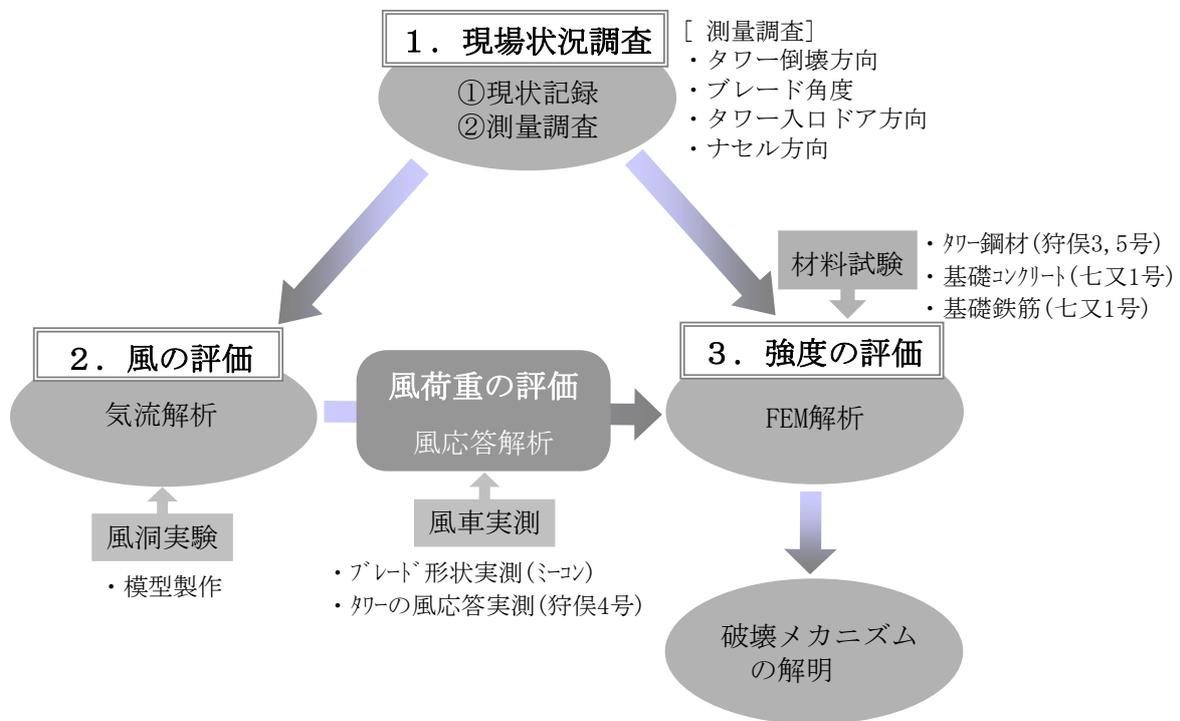


図 2-1 倒壊原因究明フロー

2.1 台風 14 号の風の評価（風洞実験・気流解析）

風力発電設備倒壊時は、系統停電のため各サイトにおいて風速、出力、ナセル方向等のデータの記録が不可能であったことから、各風力発電サイトの風速値を推定するために、風の評価を行った。

まず、風洞実験により、宮古島地方気象台地点の平均風速および乱れの強さの鉛直分布の測定を行い、気象台で観測された風速を平坦な地形上の風速・風向に変換した。次に、風洞実験で得られた結果を用いて、各風力発電サイトの気流解析を行い、各ユニットのハブ高さでの風速値を推定した。その結果を表 2.1-1 に示す。

台風が通過した際の風力発電サイトにおける風力発電設備ハブ高さでの最大風速（10 分平均）は、気象台で観測された最大風速 38.4m/s より 1.5 倍も大きく、60m/s に達している。また、最大風速を用いて計算した最大瞬間風速は、狩俣及び七又サイトとも 90m/s に達していることが解析により推定できた。

表 2.1-1 風力発電設備設置地点における風速値

サイト	ユニット	ハブ高さ (m)	シミュレーション結果	
			最大風速 (m/s)	最大瞬間風速 (m/s)
宮古風力	3 号機	36	59.7	87.9
	4 号機	36	59.2	87.3
	5 号機	36	59.4	87.6
	6 号機	46	61.5	90.3
七又風力	1 号機	44	59.8	90.7
	2 号機	35	56.8	87.4

※最大風速は 10 分平均の値である。

2.2 狩俣風力3号、5号機の倒壊原因

表 2.2-1 に各ユニットの応力値（モーメント値）を示す。3号、5号機は、台風時に限界耐力（以下、「座屈限界曲げモーメント」という）を超えるモーメント値（台風時に作用した最大曲げモーメント）が生じたためタワーが座屈し倒壊に至ったことが明らかになった。また、3号～5号機の各々のモーメント値には、台風時の風力発電設備状態（ナセル方向、タワー開口部方向）の違いにより作用した最大曲げモーメントに違いがある。同一仕様の風力発電設備にもかかわらず、4号機は「台風時に作用した最大曲げモーメント」が「座屈限界曲げモーメント」を下回っており3号、5号機と比較して有利な条件にあったことから座屈を免れた。

表 2.2-1 タワーに作用するモーメントの比較

	風車建設時に考慮した 最大曲げモーメント A (kNm)	座屈限界曲げ モーメント B (kNm)	台風時に作用した 最大曲げモーメント C (kNm)	判定
3号機	12,177	12,808	14,369	座屈 B<C
4号機	12,177	13,878	12,973	座屈せず B>C
5号機	12,177	13,492	15,398	座屈 B<C

2.3 七又風力1号機の倒壊原因

表 2.3-1 に各々のモーメント値を示す。算出したモーメント値の比較から、台風時に限界耐力（以下、「破壊限界曲げモーメント」という）を超える曲げモーメントが生じたため、基礎が破壊し倒壊に至ったことがわかった。

表 2.3-1 基礎に作用するモーメントの比較

	風車建設時に考慮した 最大曲げモーメント A (kNm)	破壊限界曲げ モーメント B (kNm)	台風時に作用した 最大曲げモーメント C (kNm)	判定
1号機	8,273	23,868	24,740	破壊 B<C

※「風車建設時に考慮した最大曲げモーメント」は、風車ナセルが風向に正対しブレードがフェザリングという状態である。

3. 今後の対応

今回の調査結果を踏まえ、今後は以下の基本的な考え方に基づき対応を図っていく。なお、詳細については、風力発電設備ごとに個別に検討していく。

(1) 設計風速の地点毎設定

沖縄県が台風の常襲地域であることや、風力発電設備設置地点毎の周辺状況を加味し地表面粗度区分を考慮することにより設計風速を設定する。

(2) 制御用バックアップ電源等の機能付加

台風時に系統停電が発生した場合、風力発電設備は制御電源喪失に伴い風向に追従するヨー制御が不能となり横風を受け、風荷重として厳しい条件となる（ピッチ制御の風力発電設備の場合）。このような事象に対応するため、系統停電時でもヨー制御を可能とする制御用バックアップ電源等の機能付加を考慮する。

(3) 風力発電設備基礎形状の見直しと鉄筋の補強

基礎の耐力を増すための対応策の一つとして、図 3-1 に示すように正八角形、台形タイプの基礎形状が考えられる。また、鉄筋本数を増やすことにより、風力発電設備基礎の耐力増加を図る。

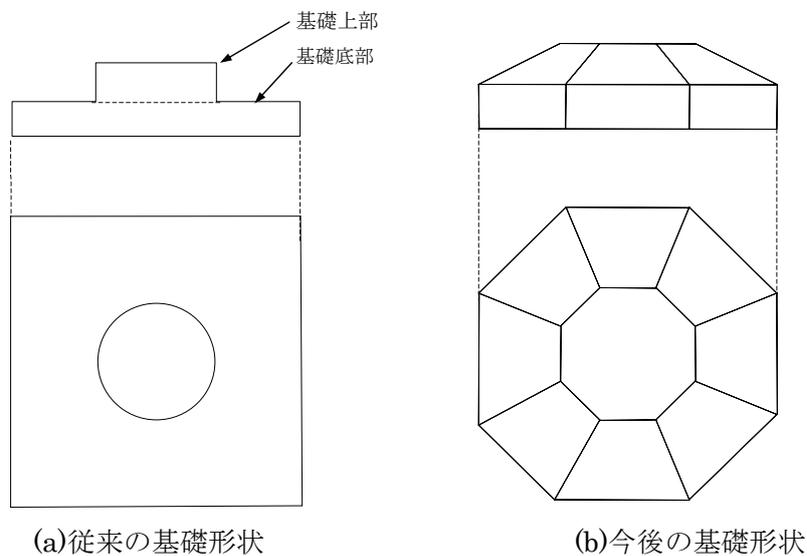


図 3-1 風力発電設備基礎の形状

(4) 既設風力発電設備への対応

風力発電設備設置地点毎に設計風速を定めて強度計算等を行うこととし、必要があればタワーや基礎の補強、制御用電源のバックアップ機能付加等の対応を図っていく。

本調査の内容を引用する際はあらかじめ、沖縄電力株式会社
研究開発部の許可を受けてください。

沖縄電力株式会社 研究開発部 技術開発グループリーダー
〒901-2602 沖縄県浦添市牧港五丁目2番1号
電話 098-877-2341 (代表)