

台風14号による
風力発電設備の倒壊等事故調査結果について

平成16年11月

沖縄電力株式会社

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)

1. はじめに

2003年9月11日に沖縄県宮古島を直撃した台風14号は、中心気圧912hPa（全国歴代4位）の過去30年間で最大級の台風であった。宮古島地方気象台では、最大風速38.4m/s、最大瞬間風速74.1m/sを記録した。

当社が保有する6基(2,900kW)の風力発電設備のうち、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。平良市の宮古風力発電実証研究設備では、3号機と5号機の風力発電設備はタワーの入口扉上部で座屈して倒壊した。倒壊を免れた4号機はナセルを損傷し、6号機はブレード折損等の損傷を受けた。また、城辺町の七又風力発電実証研究設備では、1号機は基礎破壊により倒壊し、2号機はブレード折損等の損傷を受けた。

風力発電設備倒壊等事故時の風速解析結果から、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60m/sに達し、また、最大瞬間風速は90m/sに達したことを確認した。一方、構造解析の結果、タワーの座屈倒壊や基礎の破壊について、そのメカニズムを解明することができた。

2. 台風14号の概要

平成15年9月6日15時にマリアナ諸島近海で発生した台風14号は、10日21時には宮古島の南東海上で、中心付近の最大風速が55m/sの「猛烈な台風」となった。宮古島地方は、10日17時頃から11日17時頃まで約24時間暴風域に入り、宮古島で11日03時00分に最大風速、北の風38.4m/s、11日03時12分に最大瞬間風速、北の風74.1m/s（沖縄県内で歴代4位、全国で歴代7位）が観測された。

図2-1に宮古島を直撃した台風14号の気象衛星画像を示す。

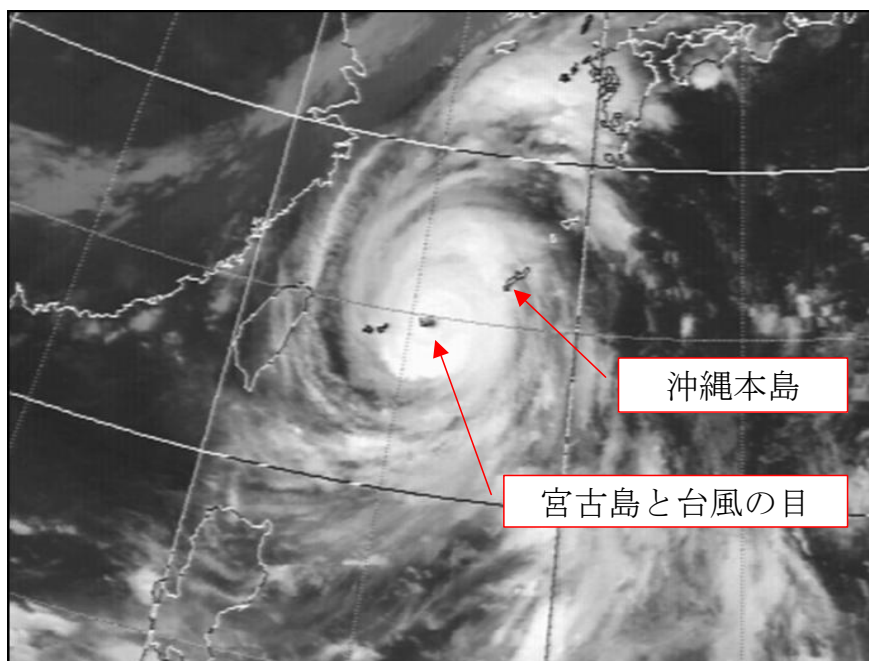


図2-1 気象衛星画像（9月11日03時）

3. 風力発電設備の被害状況

図 3-1 に宮古島の風力発電設備の位置を示す。宮古島の北側狩俣地区に位置する宮古風力発電実証研究設備（以下、「狩俣風力」という）および南東側七又海岸に位置する七又風力発電実証研究設備（以下、「七又風力」という）の総計 6 基(合計出力 2,900kW)の風力発電設備のうち、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。

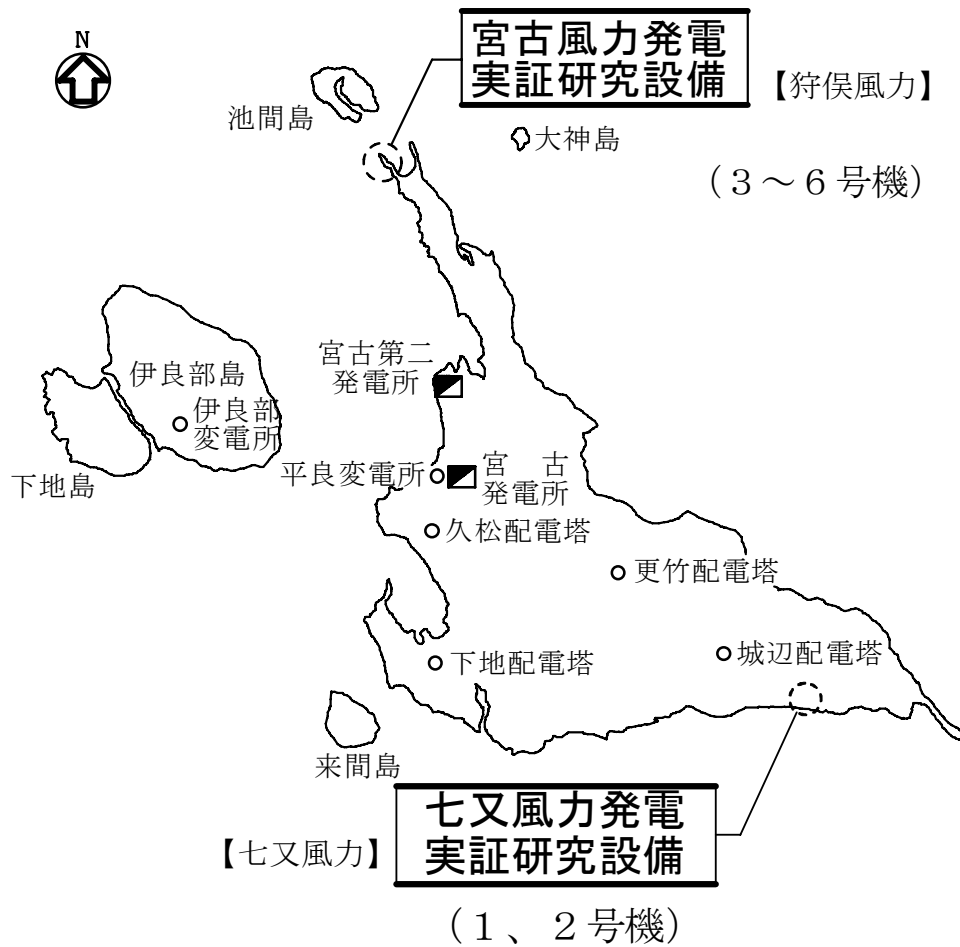
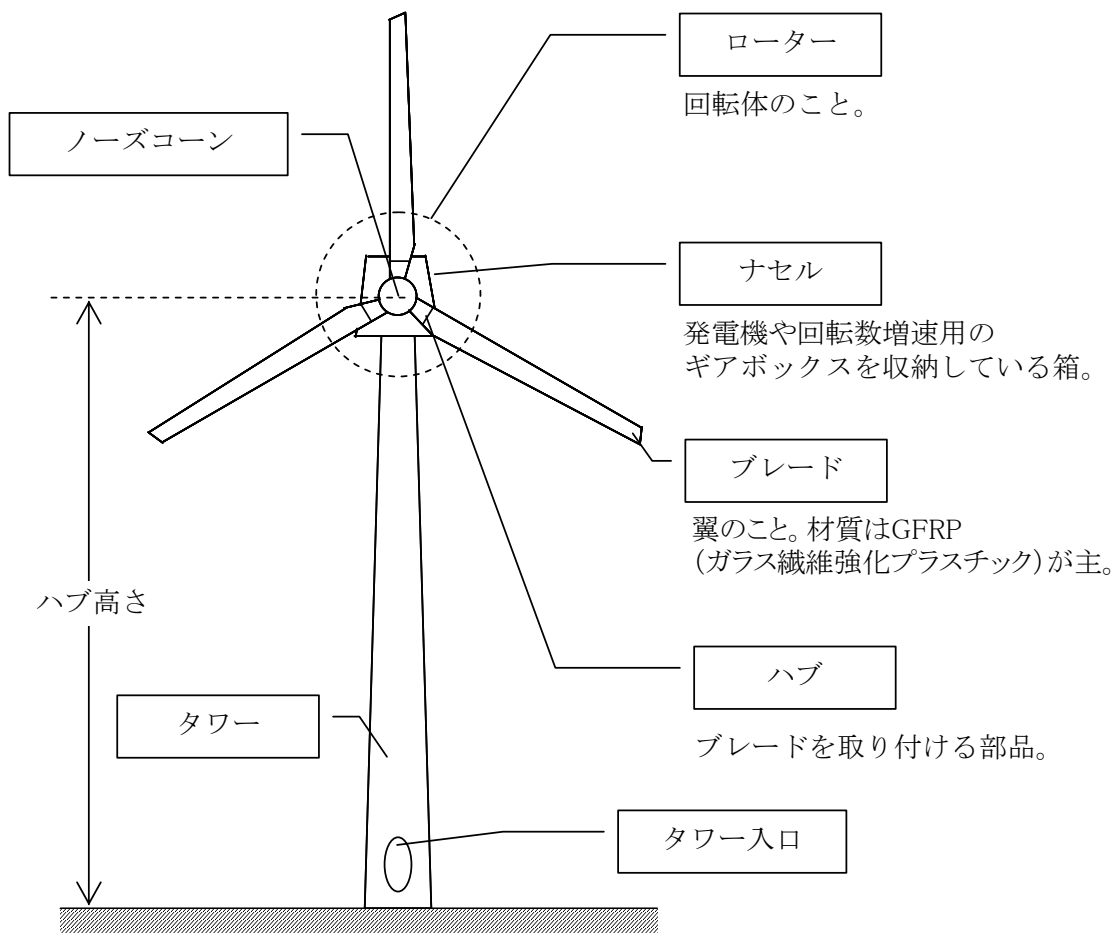


図 3-1 風力発電設備の位置

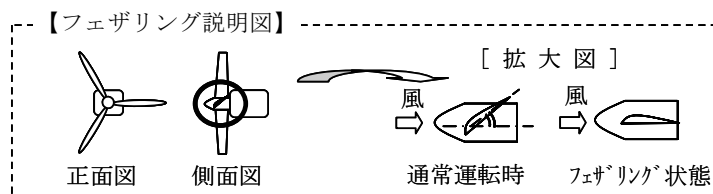
図 3-2 に風力発電設備の各部位の名称ならびに制御方式を示す。



(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 3-2 風力発電設備の各部位の名称ならびに制御方式

3.1 狩俣風力の被害状況

図 3.1-1 に狩俣風力の被害前状況写真、表 3.1-1 に設備の被害状況、図 3.1-2 に設備の被害状況写真を示す。

3号機～5号機は400kWの同一機種であるが、被害の状況が異なっていた。3号機と5号機はタワーの入口扉上部で座屈により倒壊した。4号機は倒壊の被害を免れたが、ナセルが破損した。また、600kWの機種である6号機はブレードが折損するなどの被害を受けた。



図 3.1-1 狩俣風力の被害前状況写真

表 3.1-1 狩俣風力の被害状況

	設備仕様	被害状況
3号機	製造者 : ミーコン 定格出力 : 400/100kW 制御方式 : ストール ハブ高さ : 36m	<ul style="list-style-type: none"> ・タワー入口扉上部で座屈により南西側に倒壊 ・ブレードとナセルは倒壊時の衝撃により破損
4号機	製造者 : ミーコン 定格出力 : 400/100kW 制御方式 : ストール ハブ高さ : 36m	<ul style="list-style-type: none"> ・ナセル破損 ・ノーズコーン破損
5号機	製造者 : ミーコン 定格出力 : 400/100kW 制御方式 : ストール ハブ高さ : 36m	<ul style="list-style-type: none"> ・タワー入口扉上部で座屈により南南西側に倒壊 ・ブレードとナセルは倒壊時の衝撃により破損
6号機	製造者 : エネルコン 定格出力 : 600kW 制御方式 : ピッチ ハブ高さ : 46m	<ul style="list-style-type: none"> ・ブレード折損 ・ナセル破損



(a) 3号機



(b) 4号機



(c) 5号機



(d) 6号機

図 3.1-2 狩俣風力の被害状況写真

3.2 七又風力の被害状況

図 3.2-1 に七又風力の被害前状況写真、表 3.2-1 に設備の被害状況、図 3.2-2 に設備の被害状況写真を示す。1号機は500kW、2号機は600kWで、風力発電設備の左側の設備は750kWの太陽光発電設備である。1号機は基礎破壊により太陽光設備側へ倒壊し、2号機はブレードが折損するなどの被害を受けた。

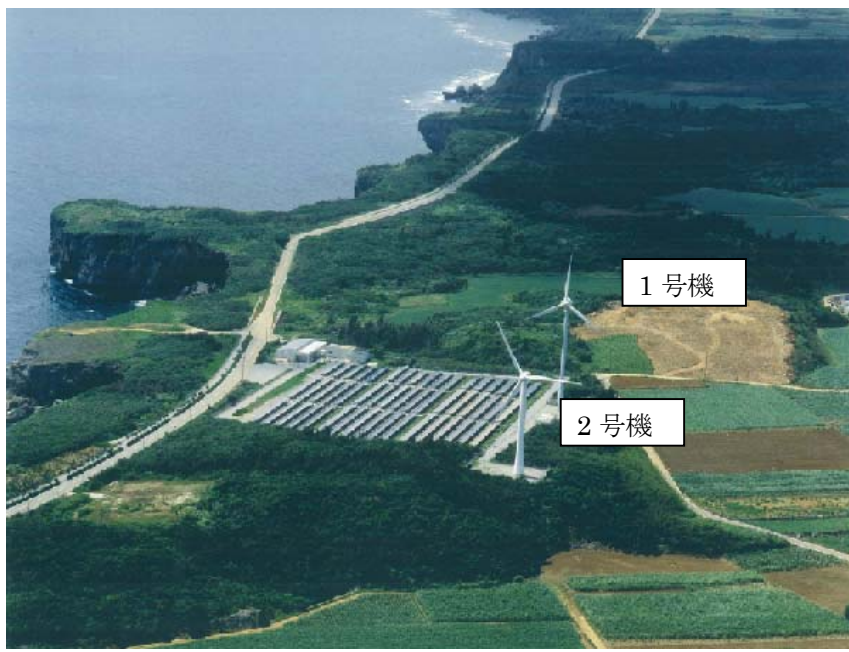


図 3.2-1 七又風力の被害前状況写真

表 3.2-1 七又風力の被害状況

	設備仕様	被害状況
1号機	製造者 : エネルコン 定格出力 : 500kW 制御方式 : ピッチ ハブ高さ : 44m	<ul style="list-style-type: none"> ・ 倒壊 ・ 基礎破壊により南側に倒壊 ・ ブレードとナセルは倒壊時の衝撃により破損
2号機	製造者 : ベスタス 定格出力 : 600kW 制御方式 : ピッチ ハブ高さ : 35m	<ul style="list-style-type: none"> ・ ブレード折損 ・ ナセル破損



(a) 1号機



(b) 2号機

図 3.2-2 七又風力の被害状況写真

表 3.2-2 に狩俣風力と七又風力の風力発電設備の被害状況の詳細を示す。

表 3.2-2 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	ベスタス/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。主筋に切断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10~20cm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	

4. 倒壊原因の究明

学識者・専門家を含めた「風力発電設備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 4-1 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。

- a. 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）
- b. 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）
- c. 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）
- d. 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）

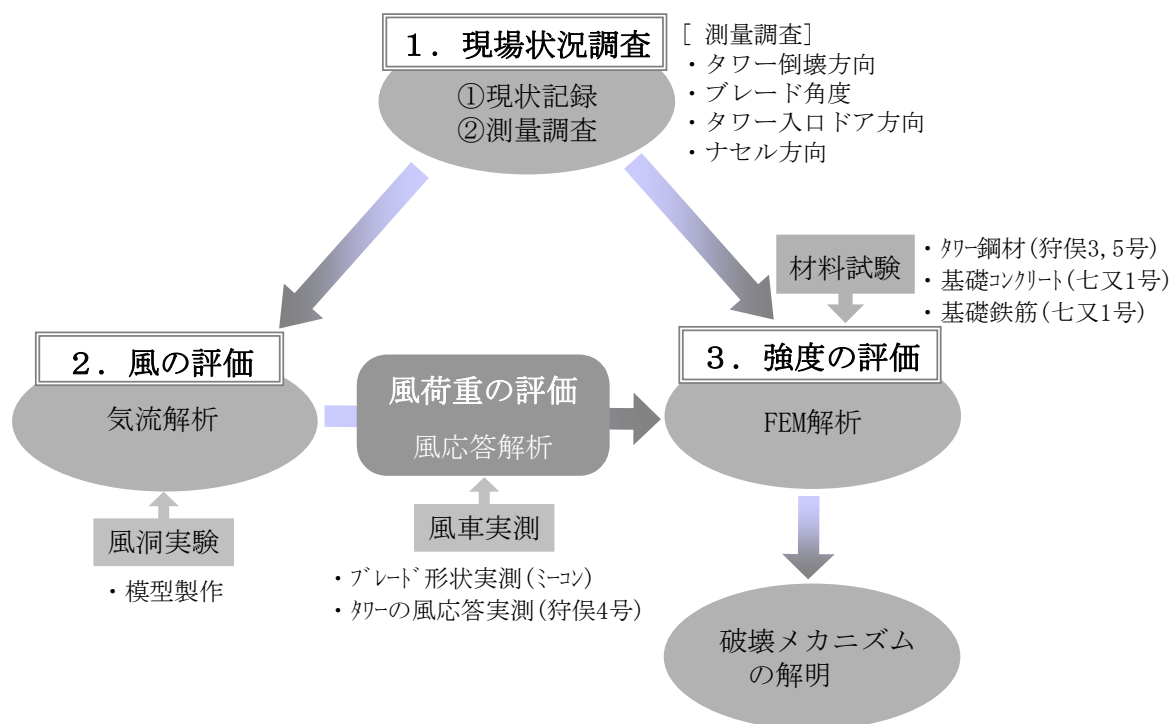


図 4-1 倒壊等原因究明のフロー

4.1 台風14号の風の評価

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が記録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。

4.1.1 風洞実験

風洞実験は、宮古島地方気象台周辺建物の影響を評価するため、図4.1.1-1に示す宮古地方気象台の測風塔を中心とする半径700m以内の全ての建物を再現した縮尺率1/1000の近傍市街地模型を製作し、東京大学風工学実験室の強風シミュレーション風洞で、気象台測風塔地点における平均風速および乱れの強さの鉛直分布の測定を行い評価し、その結果を用いて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。図4.1.1-2に平坦な地形上に変換された風速を示す。図4.1.1-2に示すとおり11日3時に気象台で観測された10分間平均最大風速38.4m/sは、建物の影響のない平坦な地形上に変換された場合に49.6m/sとなることが確認できた。

また、図4.1.1-3に平坦な地形上に変換された風向を示す。図4.1.1-3から、台風中心部通過前の11日3時の風向は360°付近であったが、台風中心部通過後の6時の風向は240°付近となり、120°程度大きく変化したことが確認できる。

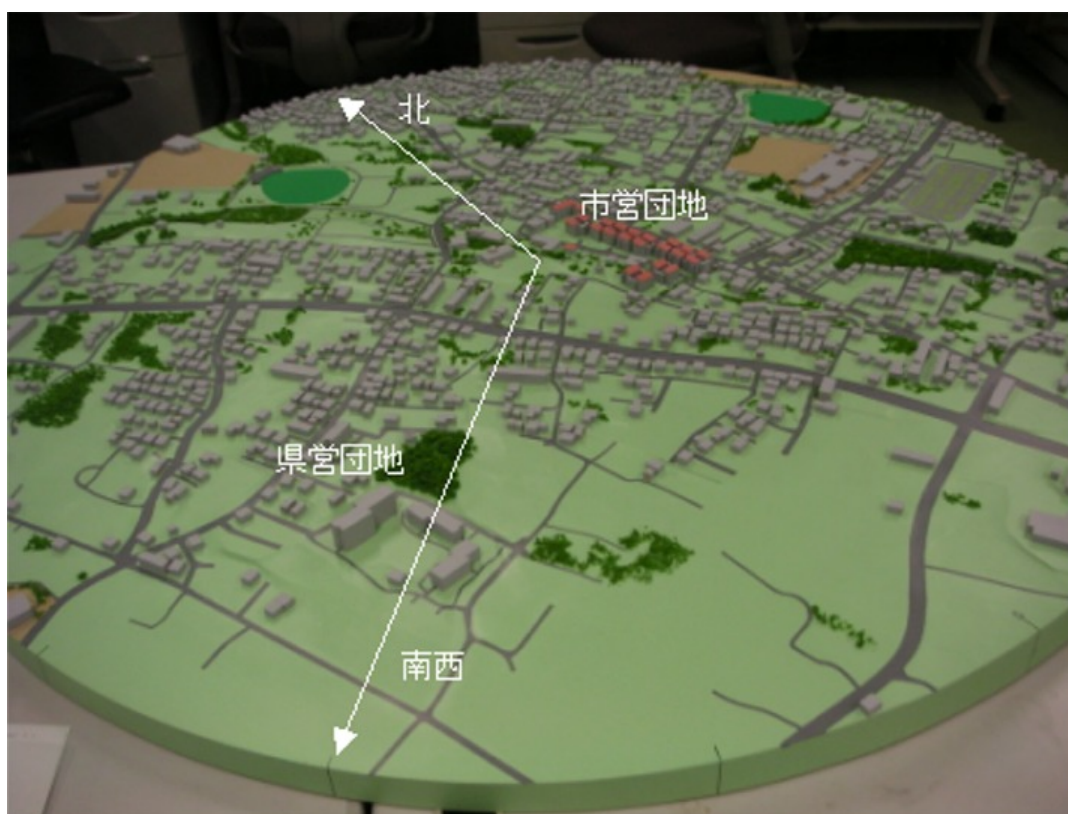


図4.1.1-1 気象台近傍の模型

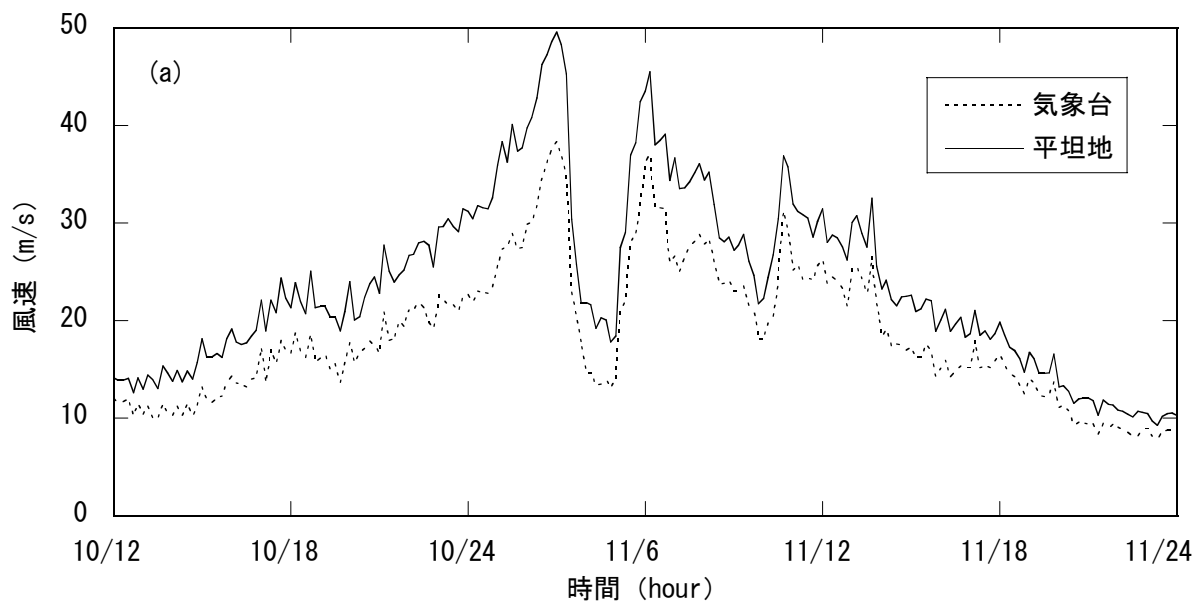


図 4. 1. 1-2 平坦な地形上に変換された風速

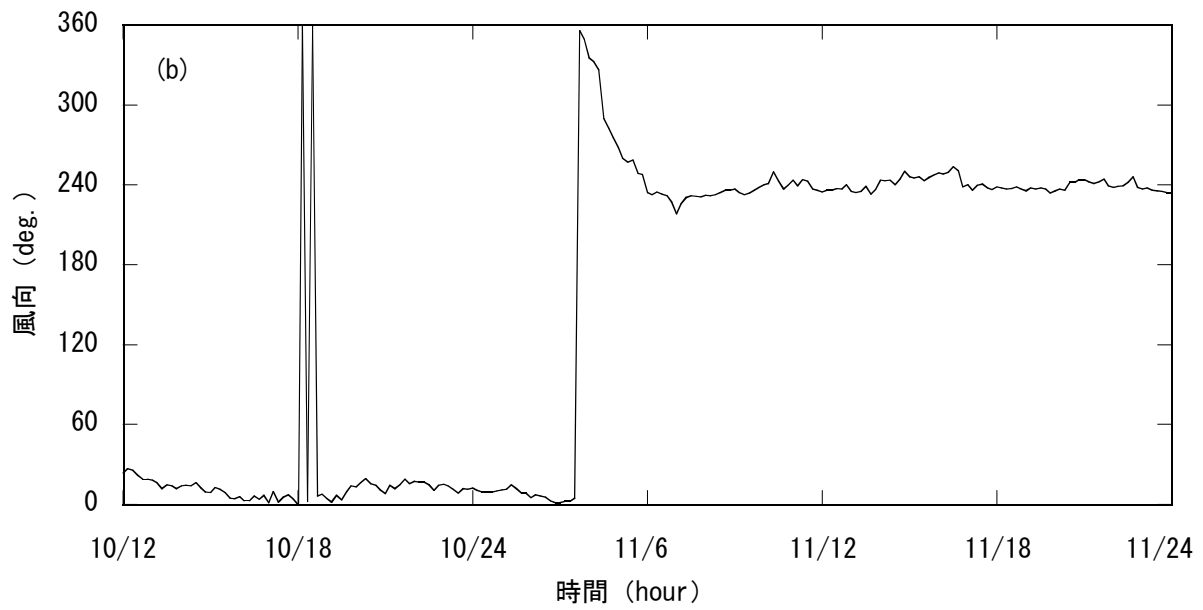


図 4. 1. 1-3 平坦な地形上に変換された風向

4.1.2 3次元気流解析

風洞実験で得られた平坦な地形上の風向・風速データを用いて、狩俣および七又サイトの地形・地表面粗度を考慮した数値モデルによる解析を行った。その結果を表 4.1.2-1 に示す。風速は各ユニットのハブ高さでの値である。

表 4.1.2-1 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)
狩俣風力	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。

4.1.3 風速評価のまとめ

- (1) 風洞実験により、気象台の風向・風速記録を平坦な地形上の風向・風速記録に変換することができた。10分間平均最大風速 38.4m/s が平坦な地形上に変換された場合に 49.6m/s (北風、1.4度) となり、吹き返し最大風速 37.1m/s が 45.5m/s (南西風、232.7度) となる。
- (2) 台風 14 号が通過した際の狩俣及び七又サイトにおける風力発電設備設置地点での最大風速 (ハブ高) 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 10 分間平均風速により推定された最大瞬間風速 (ハブ高) は狩俣及び七又サイトとも 90m/s に達していることが分かった。

4.2 狩俣風力3号・5号機の倒壊原因

4.2.1 強度の評価（構造解析：FEM解析）

狩俣風力3号・5号機の座屈倒壊に関し、タワーの座屈強度を精度良く評価するため、実機から材料試験片を切り出して材料試験を行い、その結果を用いて FEM（有限要素法：Finite Element Method）解析を行った。図 4.2.1-1 に示すように、タワー上端に水平方向の荷重を与えて耐荷力特性を求めた。

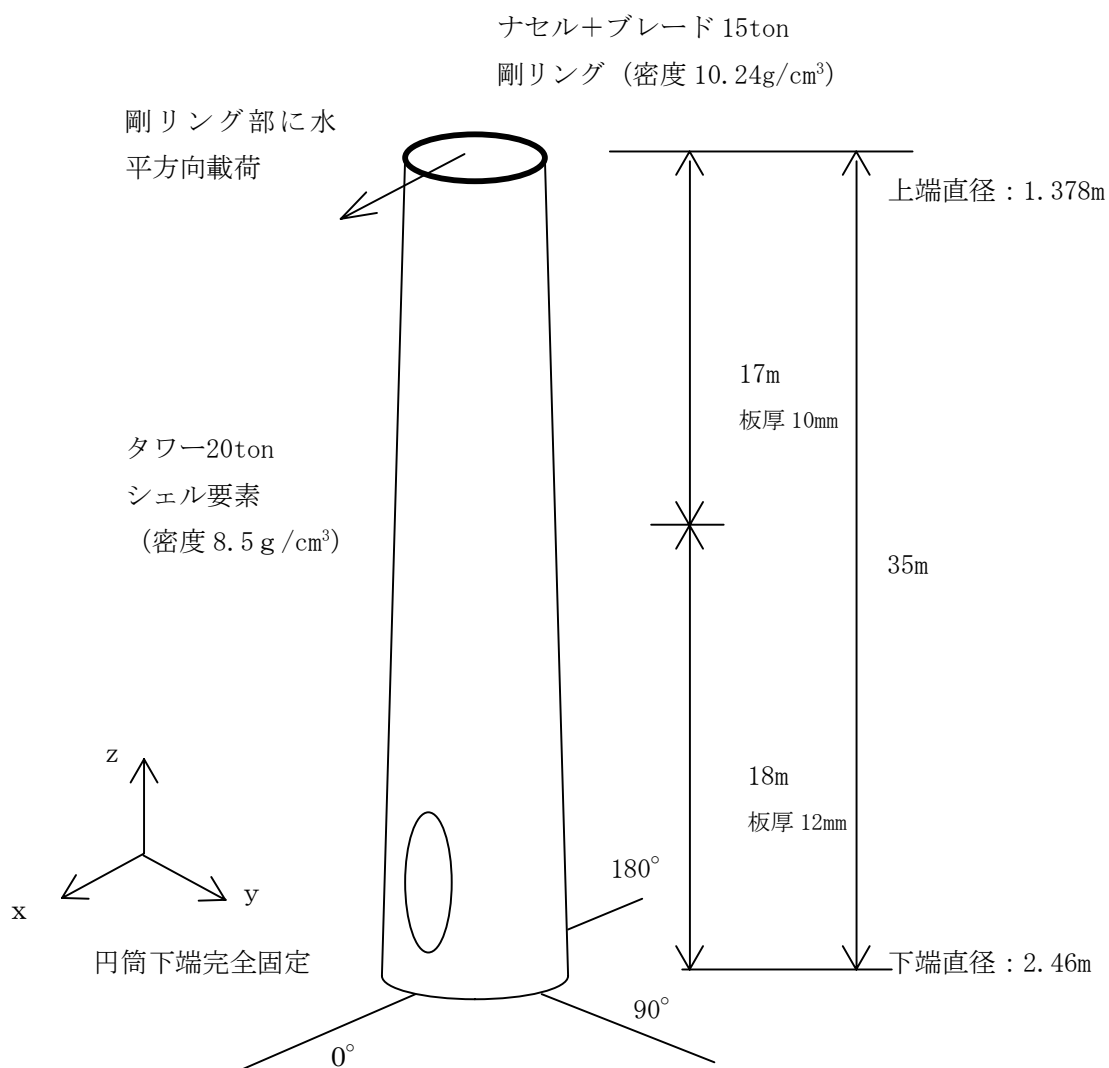


図 4.2.1-1 解析モデルの概要

FEM 解析によって得られた荷重変位関係を図 4.2.1-2 に示す。

なお、図 4.2.1-3 に示す荷重方向に対する座屈強度から、荷重を受ける方向により強度が異なり、開口部方向（ $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ）への座屈強度が低いことがわかる。

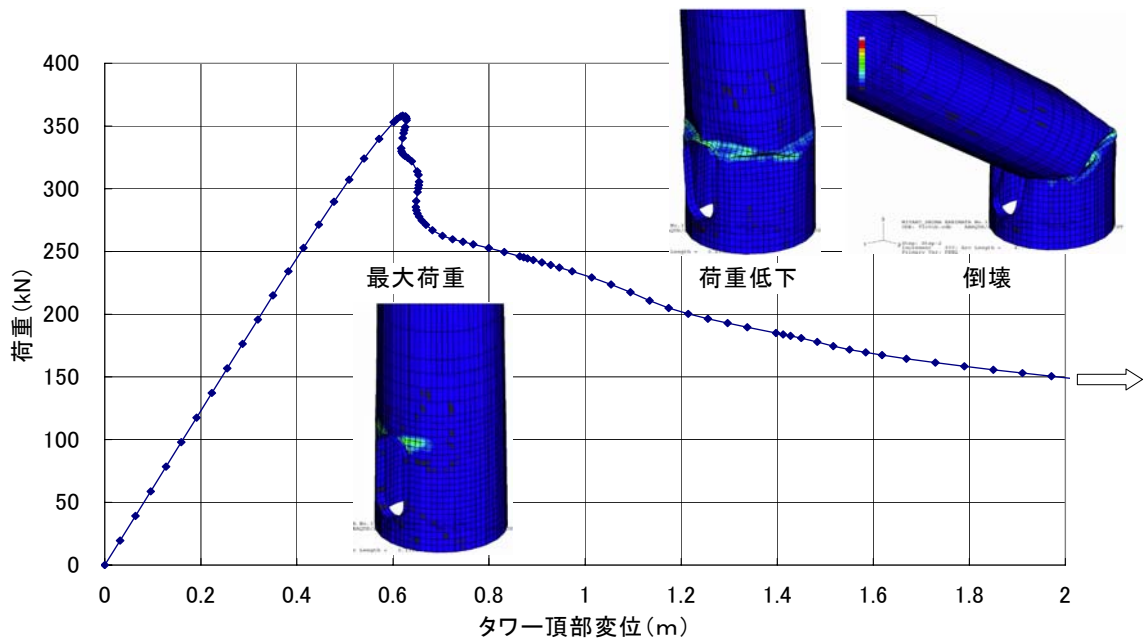


図 4. 2. 1-2 荷重変位関係

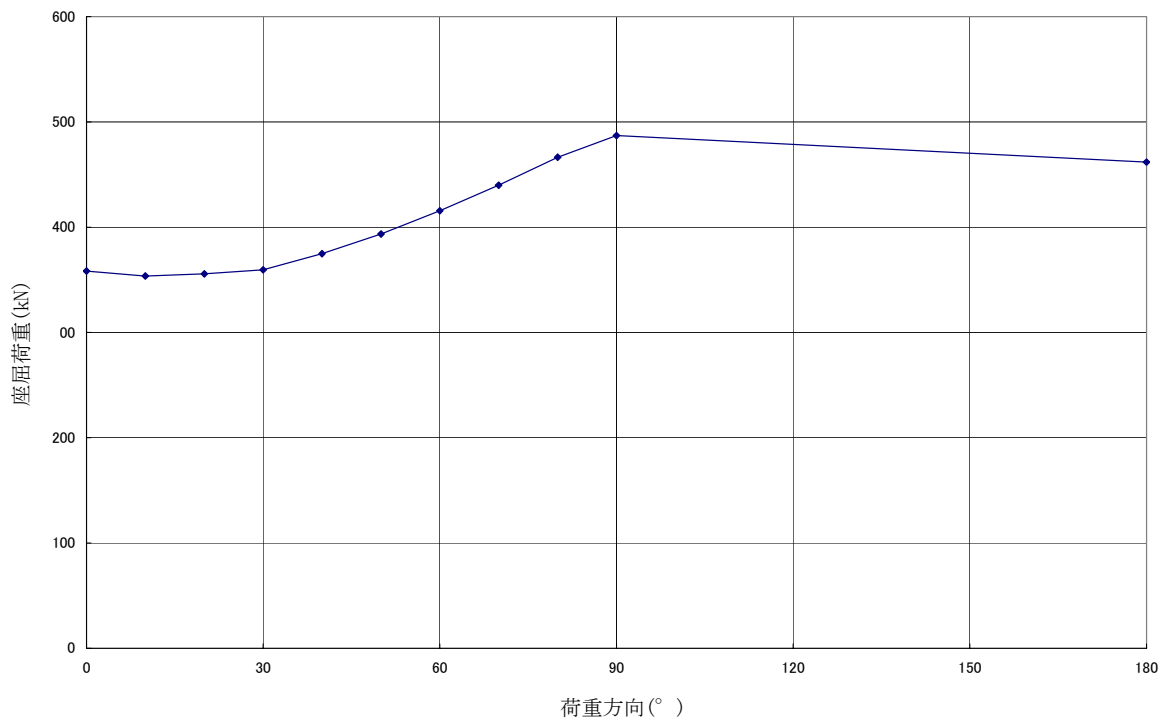


図 4. 2. 1-3 荷重方向に対する座屈強度

4.2.2 風応答解析

各風力発電設備に作用した風と、タワーの座屈荷重のデータを基に、風力発電設備が座屈する可能性を評価するため、風応答解析を実施した。

また、風応答解析を行うには、ブレード等実機の寸法・風力係数・剛性・重量を忠実に再現したモ

デル、および、風向風速データが必要となるが、ブレードに関する情報はメーカーから提供頂けなかったため、実機計測等により必要なデータを取得し解析を行った。

なお、現場調査の結果から、風向に対する3号～5号機おのこの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）は異なっていたため、その旨を解析に反映させた。図4.2.2-1に各風力発電設備のナセル、タワー開口部、倒壊方向および風向について記す。

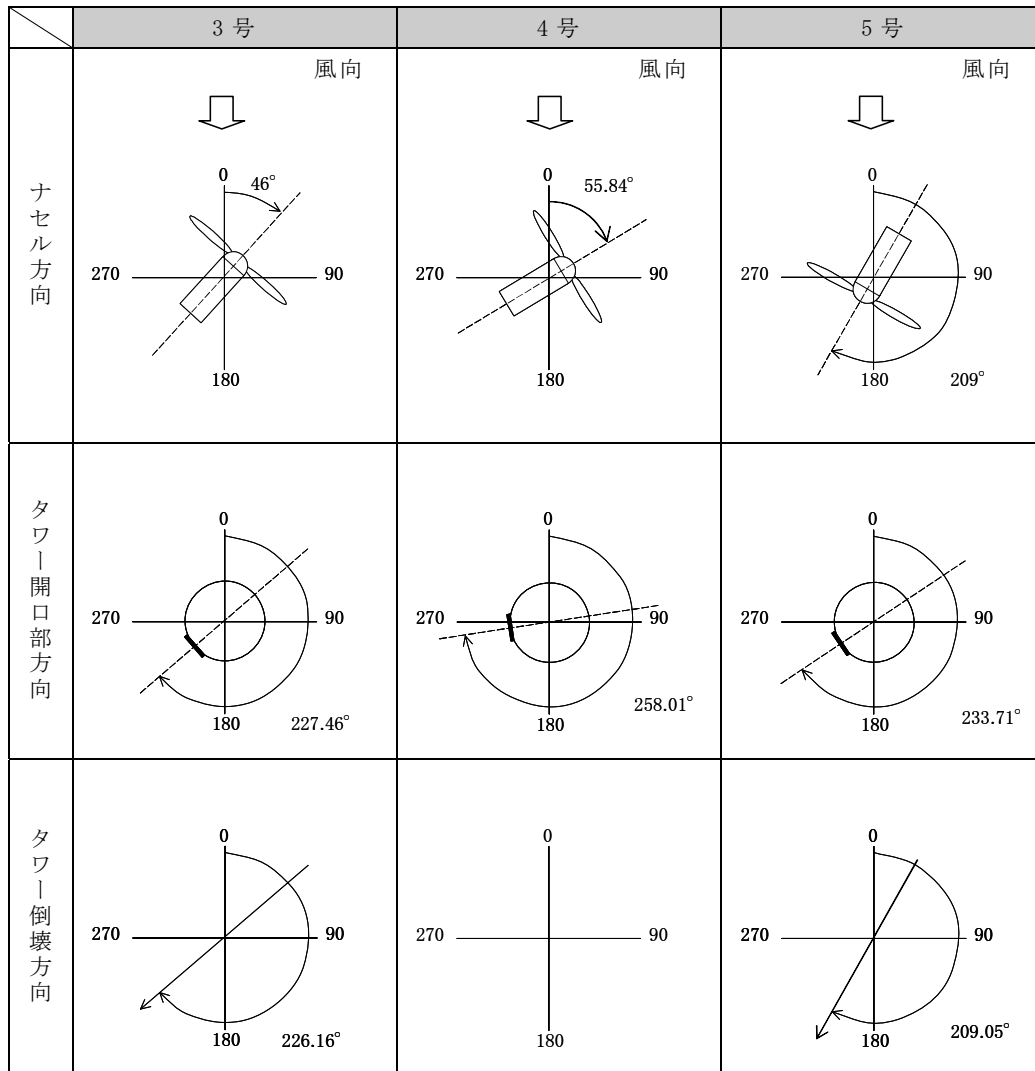


図4.2.2-1 ナセル、タワー開口部、倒壊方向および風の方向

表4.2.2-1に3～5号機のタワーに作用するモーメントを示す。表4.2.2-1から4号機において台風時に作用した最大曲げモーメントは3号機と5号機に比較して小さいことが分かる。これは、台風時における風力発電設備状態（ナセル方向、タワー開口部方向）の違いに起因している。このことから同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 4.2.2-1 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

4.3 七又風力1号機の倒壊原因

4.3.1 強度の評価（構造解析：FEM解析）

図4.3.1-1に想定した曲げモーメントと頂部変位の関係のイメージ図を、図4.3.1-2に破壊パターンイメージ図を示す。

風力発電設備基礎の破壊強度を精度良く評価するため、実機からコンクリートおよび鉄筋の材料試験片を切り出して材料試験を行い、そのデータを用いてFEM解析を行った。図4.3.1-3に要素分割図、図4.3.1-4にモーメント－タワー頂部変位関係、図4.3.1-5に主せん断ひずみコンター図（破壊直前）を示す。

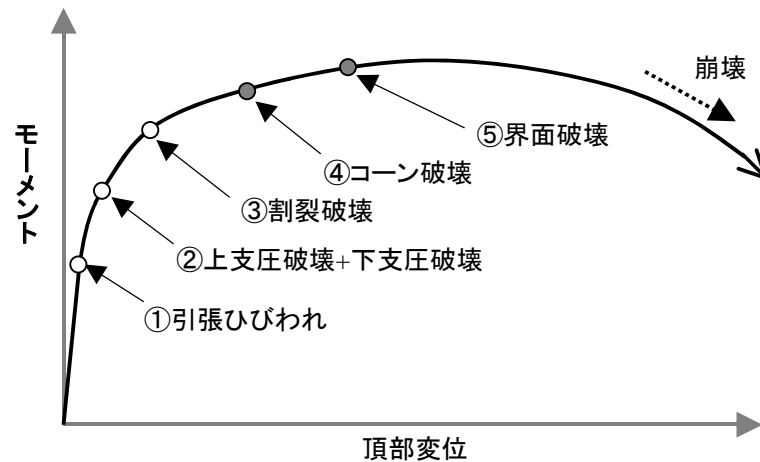


図4.3.1-1 モーメント－頂部変位関係イメージ図

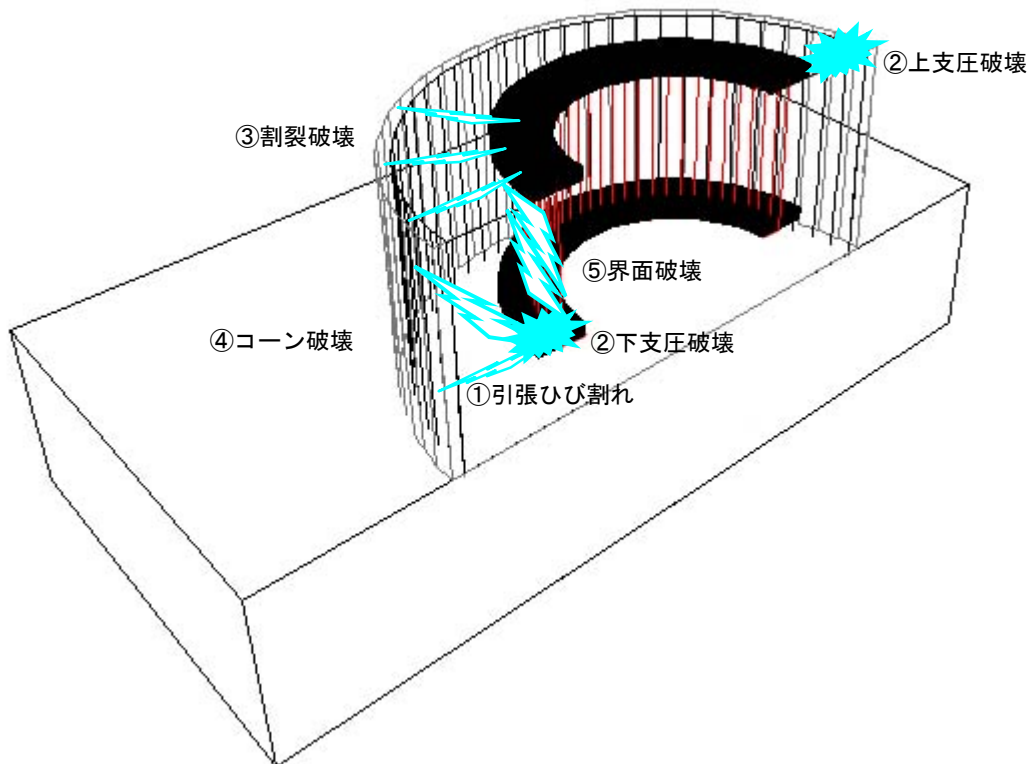


図4.3.1-2 破壊パターンイメージ図

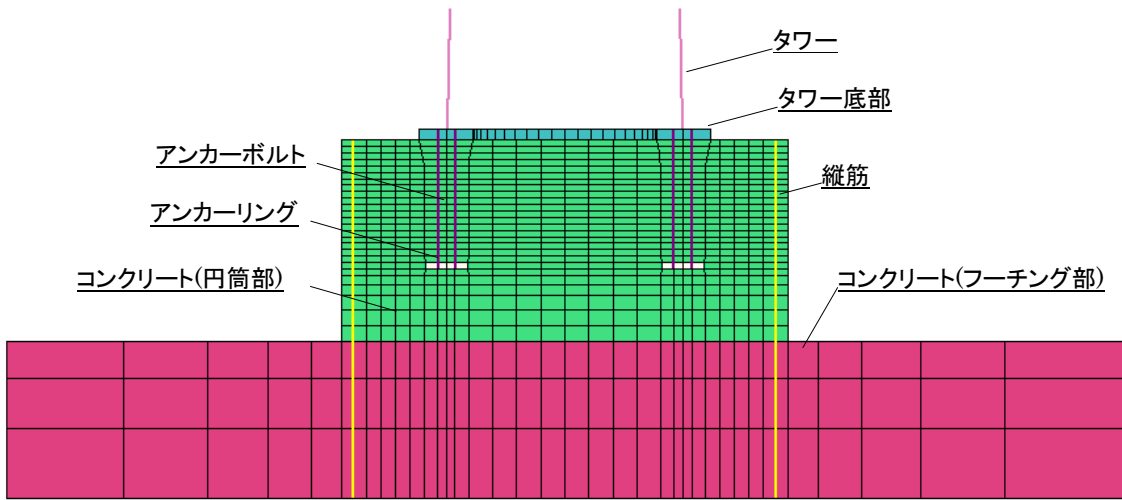


図 4.3.1-3 要素分割図

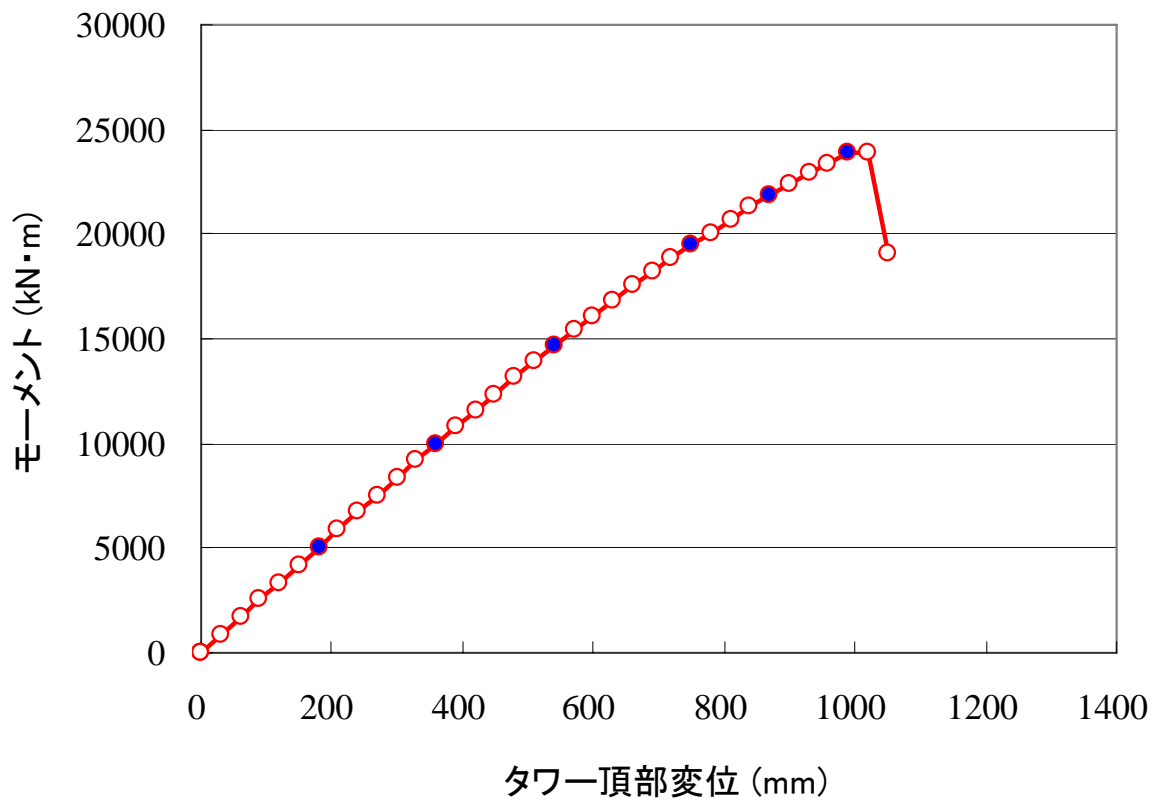


図 4.3.1-4 モーメント - タワー頂部変位関係

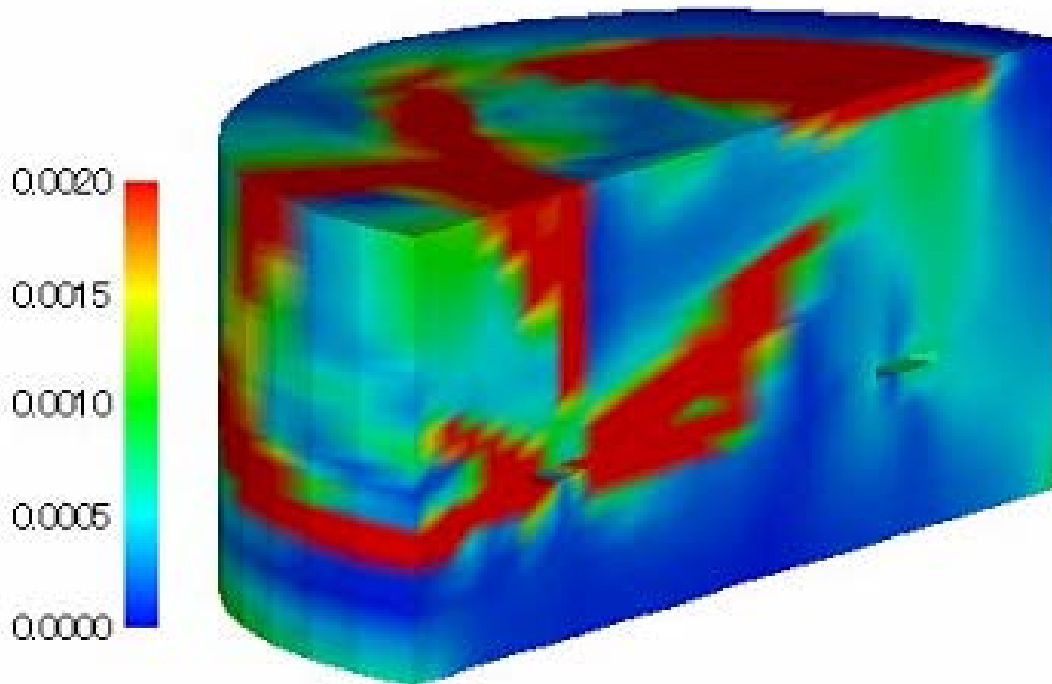


図 4.3.1-5 主せん断ひずみコンター図（破壊直前）

4.3.2 風応答解析

前述と同様に、ブレード等実機の寸法・風力係数・剛性・重量を忠実に再現したモデル、および、風向風速データを用いて風応答解析を行った。

なお、事故現場の調査結果から、1枚のブレードのみピッチ制御されたケースで検討した。表 4.3.2-1 に台風時に七又風力1号機の基礎へ作用した曲げモーメントの解析結果を示す。

表 4.3.2-1 基礎に作用した曲げモーメント

	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。

構造解析により算出した「破壊限界曲げモーメント」は23,868 kNm、風応答解析により算出した「台風時に作用した最大曲げモーメント」は24,740 kNmとの結果を得、台風時には「破壊限界曲げモーメント」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。

5. 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 5-1 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、図 5-2 に示すように風力発電設備アンカー部のコーン破壊面の有効投影面積の範囲内にせん断補強筋を配置することや、割裂ひび割れの発生を防止するためにフープ筋の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。

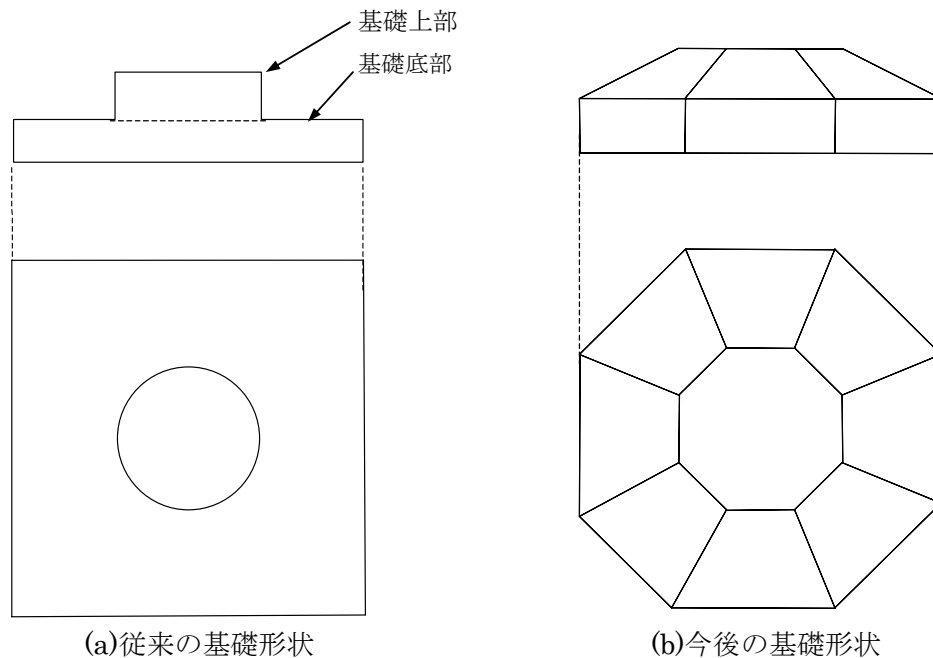


図 5-1 風力発電設備基礎の形状

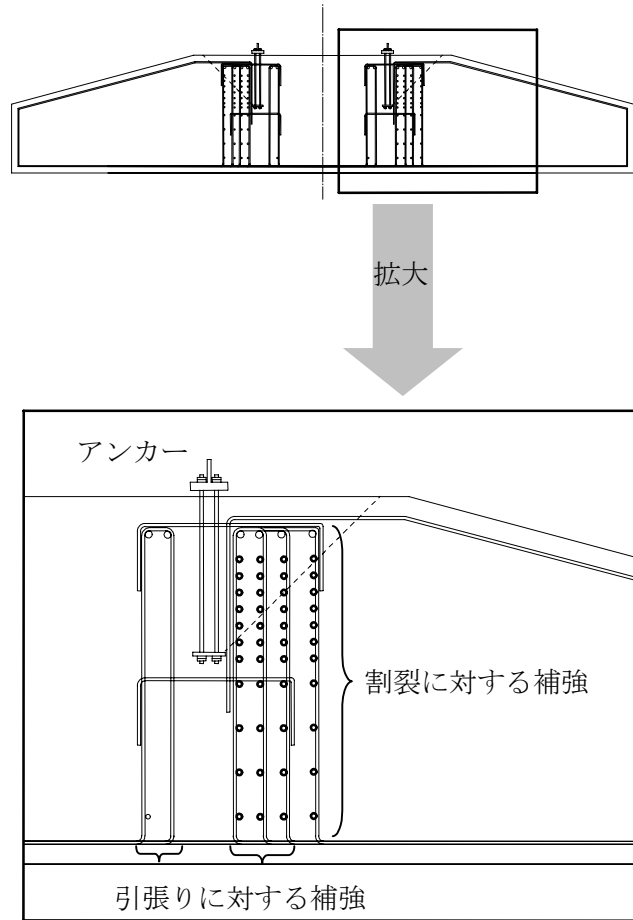


図 5-2 鉄筋の補強

(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。

以 上