

台風14号（マミー）による宮古島の風力発電設備倒壊等事故について

高原 景滋 沖縄電力株式会社 研究開発部
 銘苅 壮宏 沖縄電力株式会社 研究開発部
 新城 文博 (財)南西地域産業活性化センター
 石原 孟 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構
 松浦 真一 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域

アブストラクト

2003年9月11日に沖縄県宮古島を直撃した台風14号(マミー)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号機の風車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。

風車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、最大瞬間風速については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。

1. はじめに

宮古島は、沖縄本島の南西に位置し、島全体は概ね平坦で、最も高い地点で113mとなっている。島の面積は約150km²、人口は約47,000人、世帯数約18,000世帯を有し、沖縄県の有人島の中では比較的大きな島である。毎年、数個の台風が接近し、過去30年間で観測された最大風速は30m/s程度、最大瞬間風速は50m/s程度であった。図1-1に宮古島の位置図を示す。

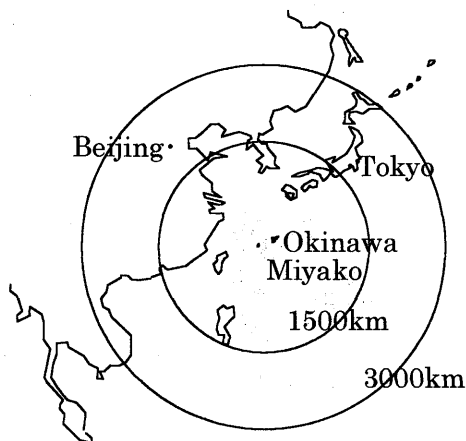


図1-1 宮古島の位置図

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。

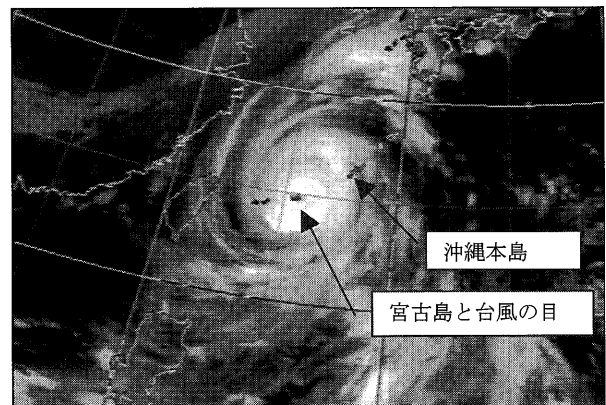


図2-1 気象衛星画像(9月11日03時)

2. 台風14号(マミー)の概要

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図を示す。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。

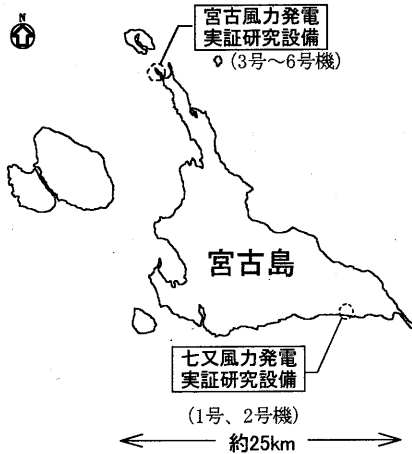


図3-1 風力発電設備の位置図

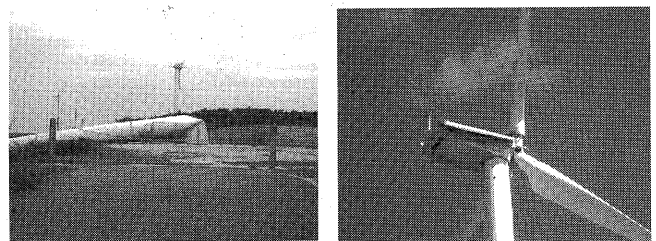
3.1 狩俣風力の被害状況

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~5号機は400kWの同機種であるが、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。

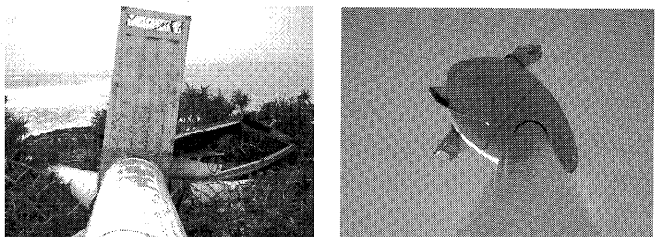
表3.1-1 狩俣風力の被害状況

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"> ・倒壊 ・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"> ・倒壊 ・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

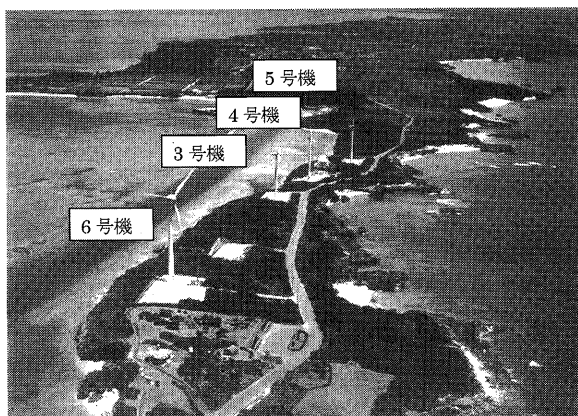


図3.1-1 狩俣風力の被害前状況写真

3号~5号機のヨー制御について、風速25m/s以上のカットアウト動作により、ナセルのフリクションブレーキでヨーを固定するが、実際の動作はブレーキが滑り、3~5号機ともナセル方向が変化した。図3.1-3に5号機の風速とナセル方向を示す。ナセル方向が94°から156°へ時計まわりに62°変化しており、30m/s程度の風速でもナセルが動いたことになる。

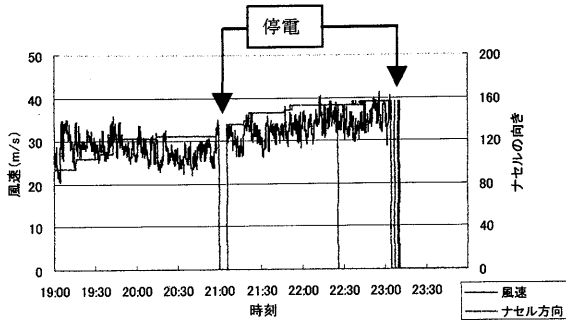


図 3.1-3 狩俣風力 5 号機の風速とナセル方向 (平成 15 年 9 月 10 日)

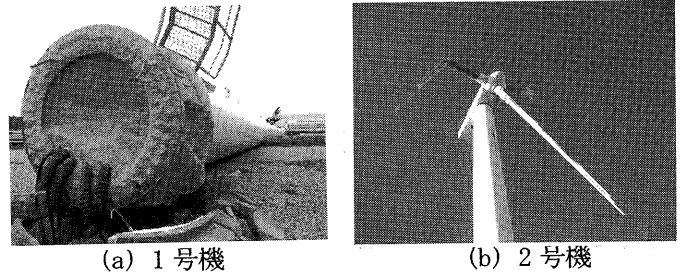


図 3.2-2 七又風力の被害状況写真

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。

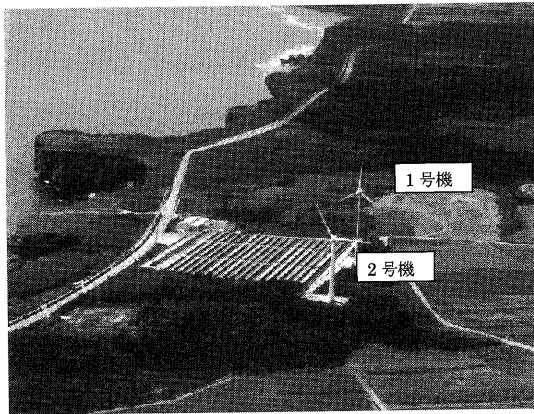


図 3.2-1 七又風力の被害前状況写真

図 3.2-1 に示す 1 号機は 500kW、2 号機は 600kW で、風車の左側の設備は 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。

表 3.2-1 七又風力の被害状況

設備仕様	被害状況
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	・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
製造者 : ベスタス 定格出力 : 600kW 制御方式 : ピッチ ハブ高さ : 35m	・ブレード折損 ・ナセル破損

4. 倒壊原因の究明

風力発電設備倒壊等事故の原因を究明するため、これまでの現場状況調査を踏まえると同時に、風の評価 (風洞実験・気流解析)、強度の評価 (タワー等構造解析 : FEM 解析)、風荷重の評価 (風応答解析) を行うことにより、倒壊のメカニズムを明らかにした。図 4-1 に倒壊等原因究明のフローを示す。

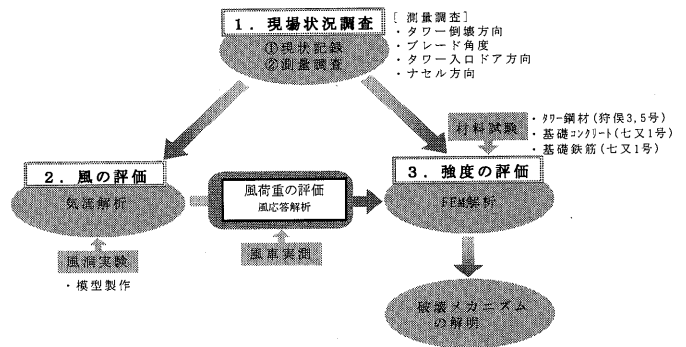


図 4-1 倒壊等原因究明のフロー

4.1 台風 14 号の風の評価

風車倒壊時は、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。

宮古島地方気象台の観測によると、最大瞬間風速は 74.1m/s、10 分間平均風速は 38.4m/s であった。しかし、宮古島地方気象台は島の市街地に位置しており、観測された風速は周辺の建物の影響を受けて風車設置地点における風速を下まわる可能性がある。このことから、宮古島地方気象台で得られた台風 14 号通過時の風観測データを基に風車設置地点における風向・風速を評価する必要がある。

一般に気象台で得られた風観測データから風車設置地点での風向・風速を推定するには、風洞実験ならびに気流解析が考えられる。風洞実験は建物お

よび植生を忠実に再現できるため、気象台近傍の建物が風観測データに与える影響を厳密に評価することが可能である。しかしながら、水面のような地表面粗度の小さい地域は縮尺モデルからの制約により風洞の中で再現することは難しい。一方、気流解析は水面を含む風車サイト周辺の地表面粗度および地形の影響を容易に評価できるが、数値解析により市街地中の建物の影響を厳密に評価するために、膨大な計算格子が必要となる。

そこで、今回は上記の二つの方法の長所を生かし、風洞実験および気流解析によるハイブリッドな評価手法を用いた。具体的には、まず気象台周辺の建物が風速に与える影響を風洞実験により評価し、台風14号の時に観測された風向・風速を平坦な地形上の風向・風速に変換する。次に、3次元気流解析による狩俣ならびに七又サイトの周辺地形および地表面粗度が風車設置地点における風速に与える影響を評価し、最後に平坦な地形上の風向・風速データを基に狩俣ならびに七又サイトの風速を評価した。

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に示す縮尺率1/1000の模型を製作し、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。

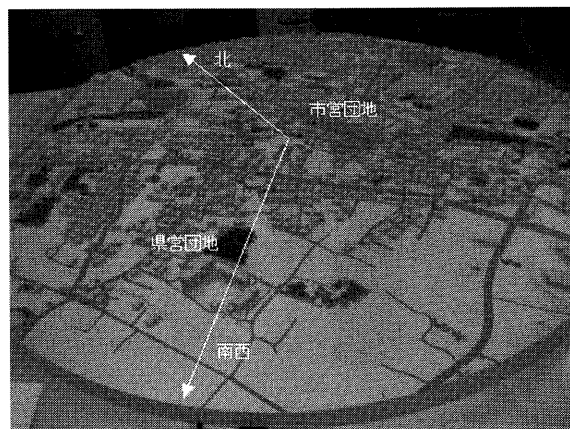


図 4.1.1-1 気象台近傍の模型

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。

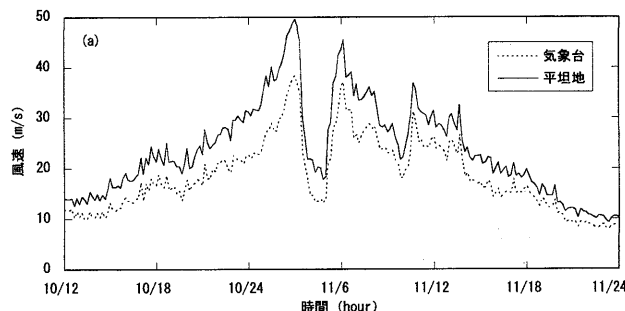


図 4.1.1-2 平坦な地形上に変換された風速

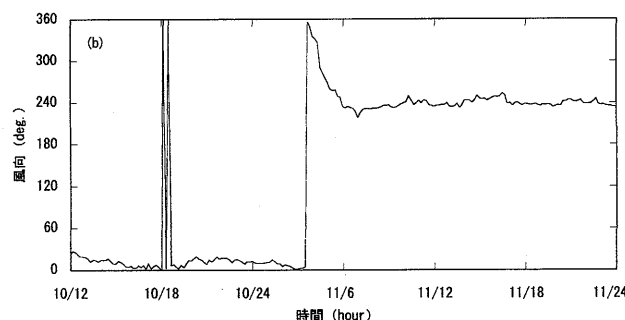


図 4.1.1-3 平坦な地形上に変換された風向

4.1.2 3次元気流解析

本解析手法の精度を確認するために、風洞実験で得られた平坦な地形上の風向・風速データから、気象台の北側に位置する沖縄電力宮古支店での風向・風速を推定し、台風14号のときに得られた同社宮古支店の風向・風速の観測値と比較した。図4.1.2-1に平均風速の推定値と観測値の比較を、図4.1.2-2に風向の推定値と観測値の比較を示す。風速、風向ともに観測値とよく一致していることを確認した。

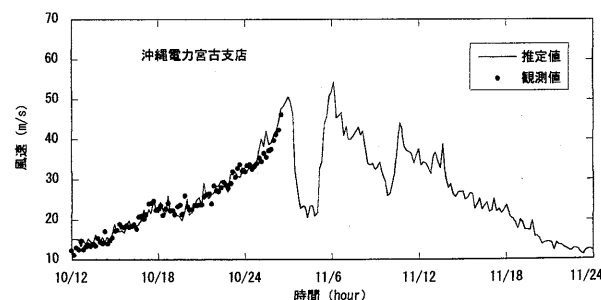


図 4.1.2-1 平均風速の推定値と観測値の比較

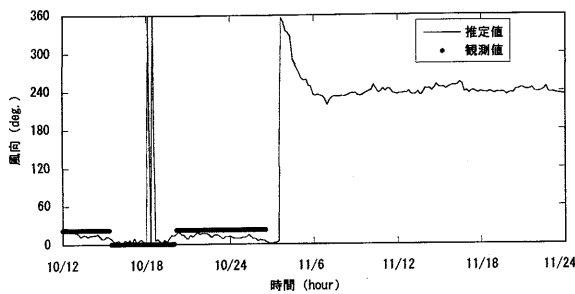


図 4.1.2-2 風向の推定値と観測値の比較

狩俣および七又サイトにおける風車設置地点で、地形・地表面粗度を考慮した数値モデルによる解析結果を表 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 風車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) 風洞実験から得られた風向別風速比より、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) 平坦な地形上の大気境界層は気流解析プログラムにより精度よく再現できる。また沖縄電力宮古支店の周辺地形及び地表面粗度を再現した気流解析により求められた台風 14 号の時の風向・風速の時間変化は観測記録とよく一致している。
- (3) 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車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 倍も高く、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。

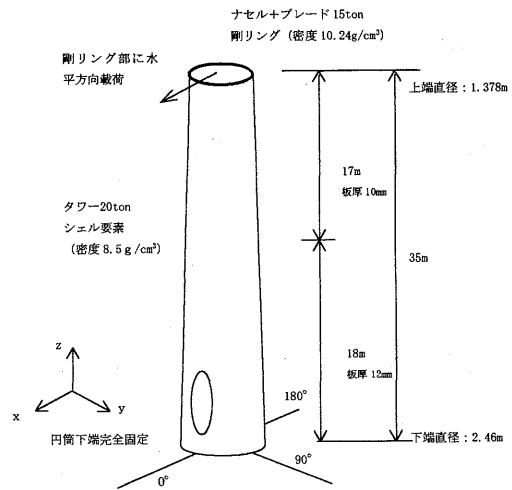


図 4.2.1-1 解析モデルの概要

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° ~ 40°) への座屈強度が低いことがわかる。

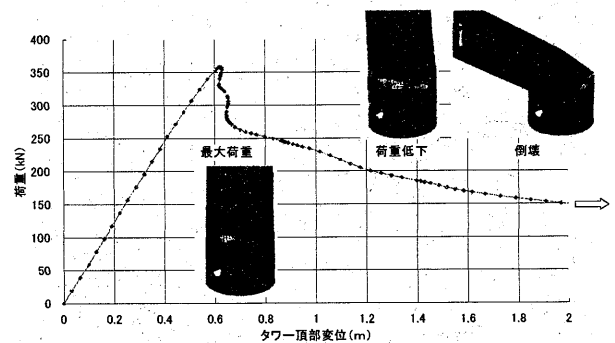


図 4.2.1-2 荷重変位関係

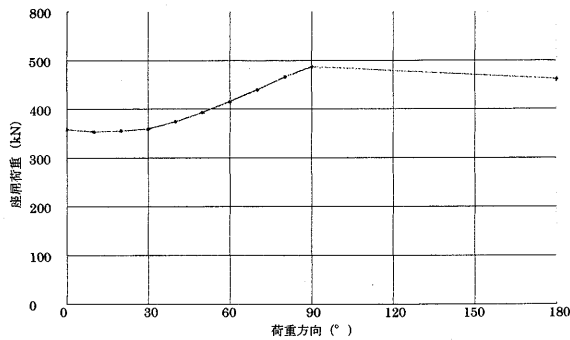


図 4.2.1-3 荷重方向に対する座屈強度

4.2.2 風応答解析

各風車に作用した風と、タワーの座屈荷重のデータを基に、風車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号機おのおのの台風時の風車状態(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に各風車のナセル、タワー開口部、倒壊方向および風向について記す。

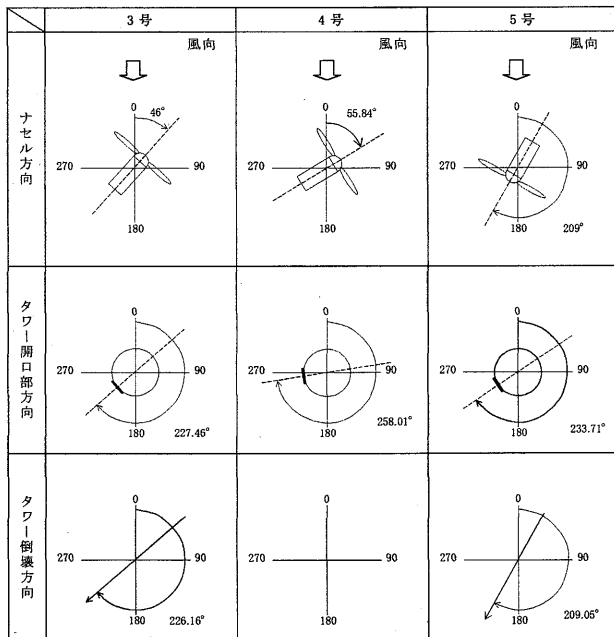


図 4.2.2-1 ナセル、タワー開口部、倒壊方向および風の方

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号機と比較して小さいことが分かる。これは、台風時に作用する風車状態(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車にもかかわらず、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)

風車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4.3.1-1に要素分割図、図4.3.1-2にモーメント-タワー頂部位変位関係、図4.3.1-3に主せん断ひずみコンター図(破壊直前)を示す。

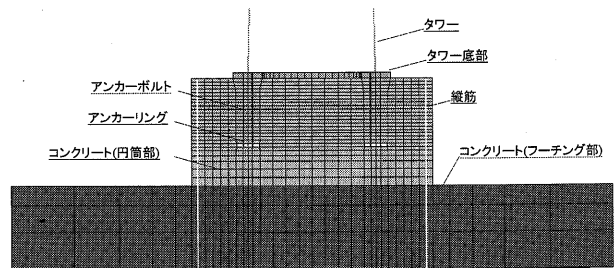


図 4.3.1-1 要素分割図

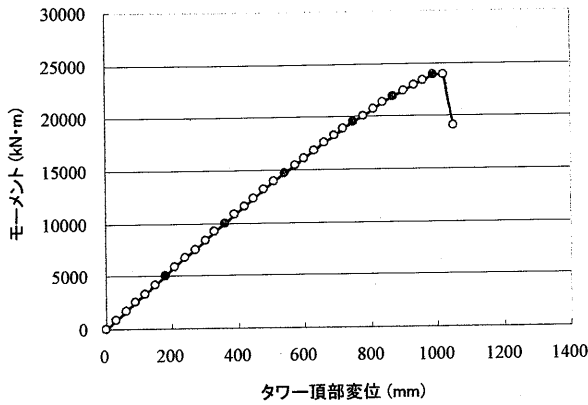


図 4. 3. 1-2 モーメント - タワー頂部変位関係

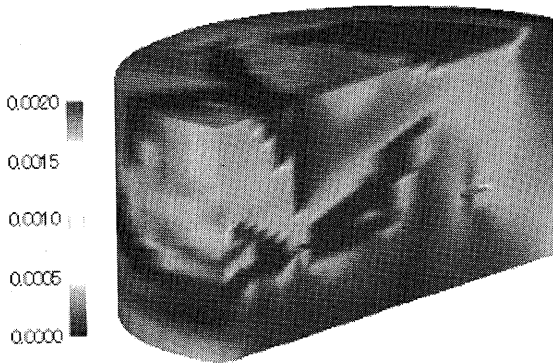


図 4. 3. 1-3 主せん断ひずみコンター図 (破壊直前)

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. おわりに

今回の調査結果を踏まえ、沖縄県が台風の常襲地域であることや、地点毎に風速が異なることを考慮して、設計風速の地域毎設定、制御バックアップ電源等の機能付加および風車基礎形状の見直しと鉄筋の補強等を検討課題として今後の対応を図っていきたいと考えている。

6. 謝辞

今回の調査・解析を進めるうえで、風力発電システムはもとより、構造力学、風工学等、多方面でのご協力を得られたことを感謝申し上げます。

特に、お忙しい中ご指導をいただいた東海大学 関教授、広島大学 中村教授、琉球大学 山川教授には大変感謝しております。

また、大変貴重なご意見をいただきました経済産業省原子力安全・保安院をはじめ、関係官署に感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 石原孟、日比一喜：急峻な山を越える乱流場の数値予測、日本風工学会論文集 No. 83, pp. 175-188, 2000.
- 2) 石原孟、山口敦、藤野陽三：複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証、土木学会論文集、No. 731/I-63, pp. 195-221, 2003.
- 3) 石原孟：非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化、日本流体力学会誌 第 22 巻、第 2 号、pp. 387-396, 2003.
- 4) MASCOT Basic ユーザーズマニュアル、Ver. 1.0, 2004.
- 5) Ishizaki, H.: Wind Profiles, Turbulence Intensities and Gust Factors for Design in Typhoon-prone Regions, J. Wind Eng. And Ind. Aerodyn., vol. 13, pp. 55-66, 1983.
- 6) 松浦真一、中村秀治、小木曾誠太郎、大坪英臣：高速増殖炉容器の耐座屈設計法に関する検討 (第 5 報、座屈解析法の適用性評価)、日本機械学会論文集 (A編)、61 巻 585 号、pp. 1006-1014, 1995. 5
- 7) 岡田恒男：アンカーボルト設計・施工の考え方、コンクリート工学、pp2-7, 1984. 7

- 8) 日本建築学会：各種アンカーボルト設計指針、1984. 1
- 9) 松崎育弘：コンクリート部材に定着したアンカーボルトの支持耐力、コンクリート工学、pp54-61、1984. 7
- 10) 飯島正義、他：支圧板付き鋼管の深礎基礎への定着に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 2、pp569-574、1996. 6
- 11) 山本晃：ねじ締結の理論と計算、養賢堂、1970. 3
- 12) 清水幹夫、他：強風時における配電線の混触に関する検討、構造工学論文集、Vol. 43A、pp. 919-928、1997
- 13) 清水幹夫、他：4 導体送電線の動的挙動に関する検討、構造工学論文集、Vol. 46A、pp. 491-500、2000.
- 14) 清水幹夫、佐藤順一：4 導体送電線のギャロッピング観測およびシミュレーション、構造工学論文集、Vol. 47A、pp. 479-488、2001
- 15) 岩谷祥美：任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション、日本風工学研究会誌、第 11 号、pp. 5-18、1982

