

南大隅 WF 風車ナセルカバー飛散・損傷事故に関する構造解析*

A structural analysis for the scattering and damage accident
of wind turbine nacelle covers in Minami Osumi WF

中嶋 智司**, 西尾 宣俊**, 大友 一之***, 永洞 和宏***, 本庄 暢之**

Satoshi NAKASHIMA, Nobutoshi NISHIO, Kazuyuki OTOMO, Kazuhiro NAGADOU, Nobuyuki HONJO

1. はじめに

2016 年台風 16 号（マラカス）は、9 月 19 日から 20 日にかけて、鹿児島県の大隅半島を直撃した。図 1 に台風 16 号の経路を示す。気象庁によると、台風 16 号は 20 日午前 0 時過ぎに大隅半島に上陸し、上陸時の中心気圧 955 hPa、最大風速 40 m/s とされている¹⁾。

台風の通過に伴い、鹿児島県肝属郡南大隅町にある電源開発株式会社が運営する南大隅ウインドファーム（以下、南大隅 WF）において、風車ナセルカバー飛散・損傷事故が発生した。図 2 に南大隅 WF（根占・佐多発電所）の位置、表 1 に南大隅 WF に設置されている風車の概要、表 2 に風車の損傷箇所を示す。全 20 基の風車のうち、8 基でナセルカバーが飛散、4 基で損傷、3 基でラジエーターカバーが飛散する被害があった。図 3 にナセルカバー被害状況の例を示す。

本稿では、まず、FRP 強度試験による FRP 材料特性の確認と、CFD 解析による風荷重の算出を行う。その後、試験より得た材料特性と CFD 解析より得た風荷重を入力とした構造解析を行った。



図 1 台風 16 号経路²⁾



図 2 南大隅 WF（根占・佐多発電所）の位置

表 1 南大隅 WF 風車概要

機種	IHI-NORDEX-1300 ³⁾
耐風速	IEC Class I
定格出力	1300 kW
ロータ径	60 m
ハブ高さ	60 m
制御方式	ストール
基数	根占：9 + 1 基（7 号地上置き） 佐多：10 基
運開	根占：2003 年 3 月 佐多：2004 年 3 月

表 2 風車の損傷箇所

損傷箇所	号機
可動式上カバーが飛散	根占 1, 3, 6, 8, 10 号, (地上置き 7 号) 佐多 2, 9 号
ラジエーターカバーが飛散	佐多 1, 7, 8 号
可動式上カバーの損傷 (落下や飛散はなし)	根占 2, 4, 5, 9 号
損傷なし	佐多 3, 4, 5, 6, 10 号

* 平成 29 年 12 月 7 日 第 39 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 電源開発（株）環境エネルギー事業部 風力発電技術室
〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1

*** 非会員 富士テクニカルリサーチ（株）技術本部
〒220-6215 神奈川県横浜市西区みなとみらい 2-3-5
クイーンズタワー C 15 階



図 3 風車の被害状況

2. ナセルカバー材料試験

ナセルカバー材料試験は、紫外線等の経年劣化の影響を加味するため、上カバー、下カバーの両方から試験片を採取した(図 4)。材料強度の方向依存性を考慮し、0、45、90° についてサンプル数 3 (N3) で試験を行った(図 5)。

試験より得た材料特性を表 3 に示す。カバー試験値の算出法は以下に従う。まず、3 方向について(N3 の平均値 - N3 の標準偏差)を算出し、各方向別の値を決定する。次に、(3 方向の平均値 - 3 方向の標準偏差)を算出し、試験値として採用した。ただし、構造解析の入力としては、ヤング率は N3 の平均値の 3 方向での最小値(上カバー: 7.19 GPa, 下カバー: 4.61 GPa)を、ポアソン比(上カバー: 0.31, 下カバー: 0.32)はヤング率の対応値を採用した(これらの値は、表 3 の値と同程度である)。

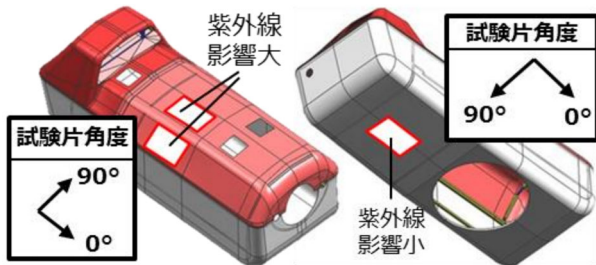


図 4 試験片採取箇所

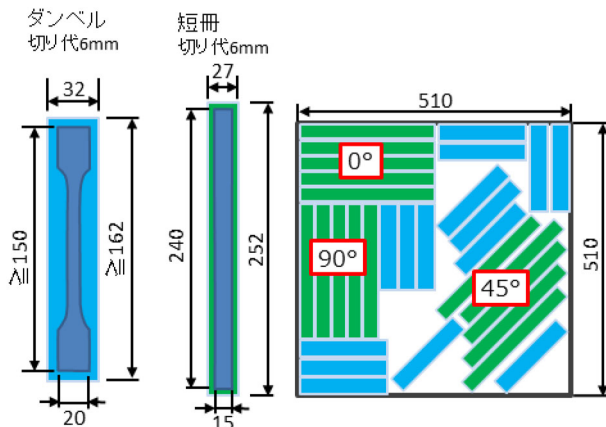


図 5 試験片切り出し寸法

表 3 試験より得た材料特性
(フレームは鋼構造設計基準より引用.)

	フレーム	上カバー	下カバー
材質	スチール (SN400)	FRP	FRP
ヤング率 [GPa]	205	6.86	4.24
ポアソン比 [-]	0.3	0.30	0.31
降伏点 [MPa]	235	-	-
引張強さ [MPa]	439	45.7	29.5
圧縮強さ [MPa]	-	138.9	62.0

3. CFD 解析

3.1. 風洞実験との比較による CFD の精度検証

実機ナセルの風荷重算出に CFD を使用する前に、風洞実験との比較により CFD の精度検証を行った。比較対象とした風洞実験は、参考文献⁴⁾の Case 4 である。使用した CFD ソフトウェアは STAR-CCM+⁵⁾ である。解析ケースを表 4 に示す。

図 6 に示すように、抗力係数、揚力係数ともに風洞実験結果に概ね一致している。また、図 7 に示すように、ピーク風圧係数 C_p も風洞実験結果と同様の傾向を示しており、ナセルカバー表面全体の合計和は風洞実験結果の 101.6%と概ね一致している。ただし、図 7 の隅角部や中央部のように、分布状況が異なる部分があり、特に、CFD で低めの C_p となっている部分については過小評価の恐れがあるので注意を要する。

表 4 解析ケース

目的	風速 [m/s]	風向 [deg] (正面 0°)	乱流モデル	解析手法
C_L, C_D 比較	8.0	0, 5, 10, 15, 45, 90, 135, 180	RANS	定常
		0, 15	LES	非定常
C_p 比較	13.5	0, 5, 10, 15	LES	非定常

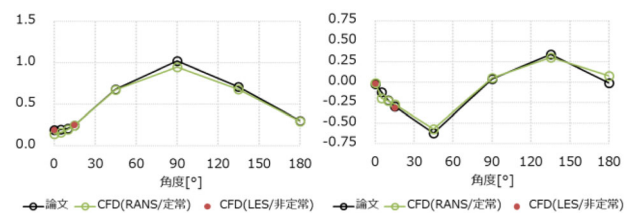
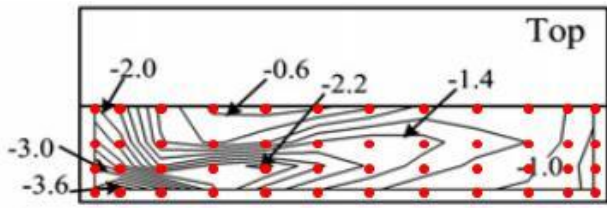


図 6 風洞実験⁴⁾と CFD による C_D , C_L の比較
(左: C_D , 右: C_L)



(a) 風洞実験結果

-2.0	-1.8	-1.0	-0.6	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.1	-1.1	-1.0	-0.8
-2.4	-2.1	-1.1	-0.8	-1.0	-1.4	-1.5	-1.5	-1.3	-1.2	-0.9	-0.7
-3.0	-2.6	-1.8	-2.1	-2.2	-1.8	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.7
-3.3	-3.6	-3.2	-2.0	-1.7	-1.5	-1.3	-1.1	-1.1	-0.9	-0.9	-0.7

(b) 風洞実験結果 (a) の赤点の値

-3.0	-2.2	-1.6	-1.1	-0.8	-0.7	-0.7	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.8
-3.8	-2.7	-1.8	-1.1	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-1.1	-1.0	-1.1	-1.1
-3.8	-2.5	-2.3	-0.9	-1.3	-1.6	-1.5	-1.3	-1.3	-1.1	-1.1	-0.9
-3.9	-2.8	-2.6	-2.3	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-1.1	-1.0	-0.8

(c) CFD 計算結果

150	122	160	183	160	117	88	55	64	55	70	100
158	129	164	138	100	57	53	53	85	83	122	157
127	96	128	43	59	89	100	100	118	110	122	129
118	78	81	115	88	87	92	100	91	122	111	114

(d) (c) の値 / (b) の値 [%]

図 7 ピーク風圧係数 C_p の比較 (ナセル上面)

3.2. 実機ナセルの CFD 解析

構造解析の入力となる風荷重算出のために、実機ナセルについて LES 解析を行った。ナセル風速計のデータから、事故当時の最大風速 (10 分平均) は 40 ~ 45 m/s だと推定されている。今回の解析では、45 m/s の 1.4 倍である 63 m/s を最大瞬間風速と推定し、流入風速に設定した。台風通過時にも基本的にはヨー制御を行っているため、風はナセル正面から流入する (風向 0°) と仮定して解析を行った。

図 8 に流速分布、図 9 に圧力分布を示す。ナセル正面では正圧が発生しているのに対し、隅角部では流れが加速して負圧が発生していることが分かる。

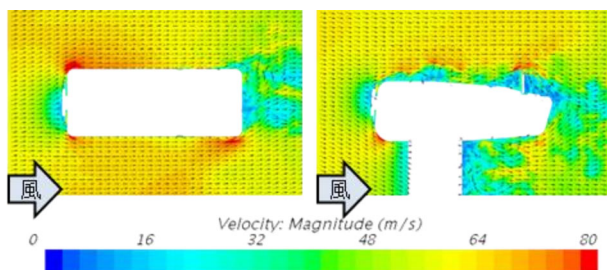


図 8 流速分布

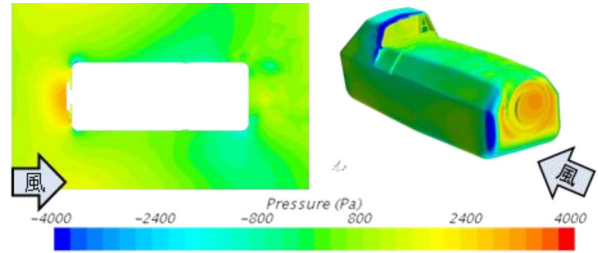


図 9 圧力分布

4. 構造解析

材料試験による材料特性と CFD で得られた圧力分布を FEM へ適用して構造解析を行い、事故要因の分析を行う。

ナセルの可動式上カバーの下端部はフレームと直接接着される設計となっているが、今回の事故では複数の風車においてこの接着部の剥離が生じていた (図 10)。この剥離の影響を加味するため、上カバーとフレームの接着有り・無し の 2 パターンで解析を行った。

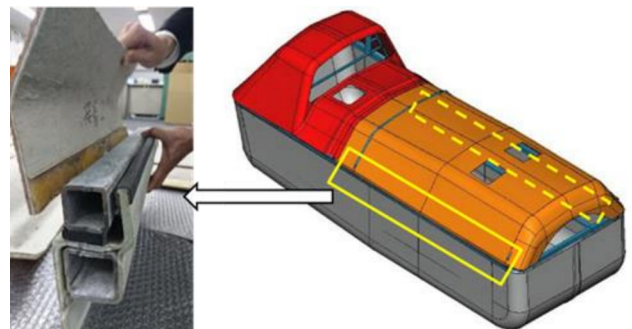


図 10 上カバー下端接着部の剥離

接着有りの場合の、ナセルカバーの変形状態を図 11、ナセルカバー発生応力を図 12 に示す。この場合、フック側でカバーの横ずれが生じるが大きな変形は生じない。カバー横ずれに伴いフックやヒンジ側フレームで高応力が生じるが、カバーでは損傷が生じるような応力は発生していない。

接着無しの場合の、ナセルカバーの変形状態を図 13、ナセルカバー発生応力を図 14 に示す。この場合、カバーのヒンジ側で大きな変形が生じ、フックやヒンジ側フレームで高応力が生じている。また、上カバーにも引張強度を超える力が発生していることがわかる。

以上から、上カバー・フレーム接着部の剥離によってナセルカバーに生じる力が増大し、カバーに大

きな変形が生じることが定量的に確認された。この結果より、上カバー・フレーム接着部の劣化・剥離が事故の主要因だと考えられる。この劣化・剥離は、メンテナンス時に接着部を補修していれば防ぐことができたと予想される。

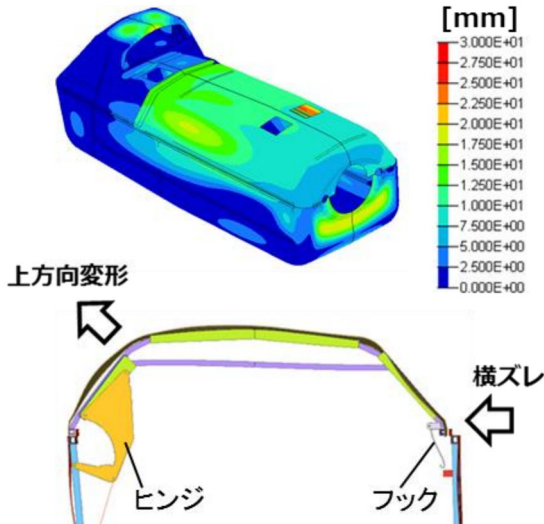


図 11 ナセルカバーの変形（接着有り，倍率 10）

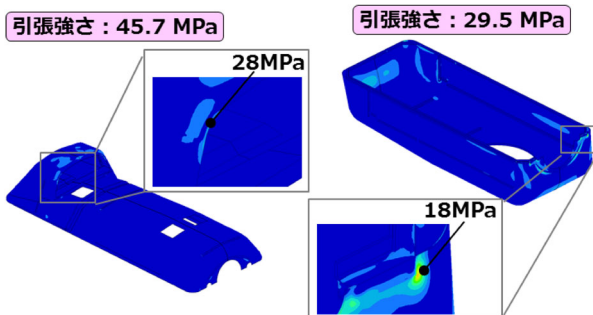


図 12 ナセルカバー発生応力（接着有り）
（左：上カバー，右：下カバー）

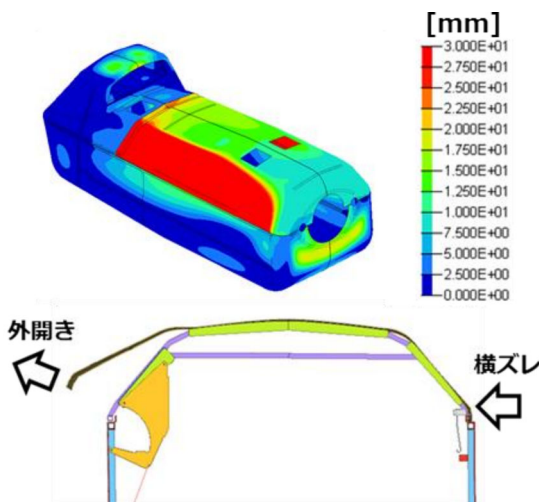


図 13 ナセルカバーの変形（接着無し，倍率 2）

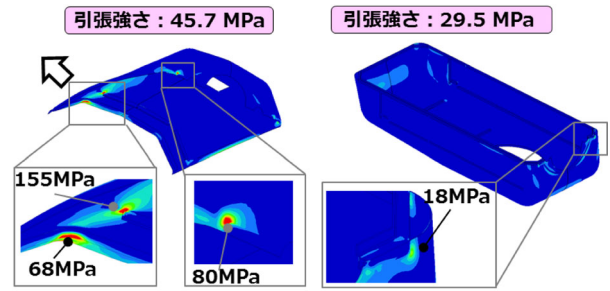


図 14 ナセルカバー発生応力（接着無し）
（左：上カバー，右：下カバー）

5. まとめ

2016 年台風 16 号による南大隅 WF 風車のナセルカバー飛散・損傷事故について、構造解析を行った。

- ・ 材料試験により、カバー材料特性を確認した。
- ・ CFD による揚力・抗力係数，ピーク風圧係数を風洞実験と比較し，CFD の妥当性を確認した。
- ・ 実機ナセルの CFD 解析を行い，事故当時の風圧荷重の再現を行った。
- ・ 材料試験結果，CFD より得た風圧荷重を入力として，FEM 構造解析を行った。上カバー・フレーム接着部の剥離の影響を加味するため，接着有り・無しの 2 パターンで解析した。
- ・ 接着有りの場合は，カバーに大きな変形は生じず，上カバーを損傷するような力は生じていない。一方，接着無しの場合は，カバーのヒンジ側で大きな変形が生じ，上カバーの引張強度を超える力が発生している。
- ・ 上カバー・フレーム接着部の劣化・剥離が，今回の事故の主要因だと推定される。接着部の劣化・剥離をメンテナンス時に補修していれば，事故を防止できた可能性が高い。

参考文献

- 1) 気象庁，「2016 年（平成 28 年）の台風について（確定）」，平成 28 年報道発表資料，2017
- 2) ウェザーニュース報道，
<http://weathernews.jp/s/topics/201609/190125/>
- 3) NORDEX, N60/1300 kW,
http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex_N60_EN.pdf
- 4) Hiroshi Noda and Takeshi Ishida, “Wind tunnel test on mean wind forces and peak pressures acting on wind turbine nacelles”, Wind Energy, Vol.17, Issue 1, pp.1-17, 2014
- 5) CD-adapco ウェブページ，
http://www3.cd-adapco.com/translations/ja_jp/products/star_ccm_plus/index.html