

# 南大隅 WF 風車ナセルカバー飛散・損傷事故の 再発防止に向けた強度対策検討

## Study on Strength Measures for the Prevention of Recurrence of the Scattering and Damage Accident of Wind Turbine Nacelle Covers in Minami Osumi WF

渡辺 直登<sup>\*1</sup> 中嶋 智司<sup>\*1</sup> 西尾 宣俊<sup>\*1</sup>  
大友 一之<sup>\*2</sup> 永洞 和宏<sup>\*2</sup> 本庄 暢之<sup>\*1</sup>

Naoto WATANABE Satoshi NAKASHIMA Nobutoshi NISHIO  
Kazuyuki OTOMO Kazuhiro NAGADOU Nobuyuki HONJO

<sup>\*1</sup>Electric Power Development Co., Ltd., Wind Power Business Dept, Engineering Office, 15-1 Ginza 6-Chome, Chuo-ku, Tokyo, 104-8165, Japan,

Fax: +81-3-3546-8230, E-mail: naoto\_watanabe@jpower.co.jp

<sup>\*2</sup>Fuji Technical Research Co., Ltd., Queen's Tower C 15F 2-3-5 Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 220-6219, Japan

### Abstract

In September of 2016, Typhoon No.16 hit the southern Osumi Peninsula in Kagoshima prefecture, and wind turbines' nacelle covers were scattered and damaged at Minami Osumi WF. In order to prevent the recurrence of the accident, we investigated the cause of the accident. We performed structural analysis by FEM with wind load calculated by CFD and FRP properties obtained by material test of the actual nacelle cover. By the analysis, we found that the deterioration and peeling of the adhesion joint between the nacelle upper cover and the frame was the main cause of the accident. Based on the cause, we proposed nacelle cover reinforcement measures such as change of material and structure. We conducted FEM analysis on the nacelle cover with those reinforcement measures and confirmed that it will not be damaged even under the extreme wind conditions such as DLC6.1 or DLC7.1.

キーワード：ナセルカバー，事故再発防止策，FEM 構造解析，CFD 流体解析，FRP 材

Key Words : Nacelle Cover, Measures for the Prevention of the accident, FEM, CFD, FRP

### 1. はじめに

2016 年 9 月 19 日から 20 日にかけて，台風 16 号（マラカス）が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<sup>1</sup>．

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を示す．

本稿では，まず，台風の強風により南大隅 WF が受

けた被害の状況と事故当時の風況について調査・確認し，整理した．

次に，事故要因特定のため，ナセルカバーを 3D モデリングし，CFD による流体解析から風荷重の算出を行った．加えて，実機ナセルから採取した FRP サンプルで材料試験を行い，材料特性を確認した．そしてこれらを入力値とした FEM による構造解析の結果より，ナセルカバー飛散・損傷事故の原因を究明した．

最後に，これら事故要因を踏まえ，ナセルカバーの補強策として材質や構造の変更を提案した．変更を施したナセルカバーで CFD を用いて試験風に対する風荷重を算出し，あわせて材料試験で新たな FRP 材の材料特性を確認した．そして FEM による構造解析を実施し，補強策とした変更内容が妥当であるかを検証した．

<sup>\*1</sup> 電源開発（株）風力事業部技術室  
（〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1）

E-mail: naoto\_watanabe@jpower.co.jp

<sup>\*2</sup> 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）

（原稿受付： 年 月 日）



図 1 台風 16 号経路<sup>2)</sup>



図 2 南大隅 WF (根占・佐多発電所) の位置<sup>3)</sup>

表 1 南大隅 WF 風車概要

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| 機種   | IHI-NORDEX-1300 <sup>4)</sup>    |
| 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 号は現在撤去)<br>佐多：10 基 |
| 運開   | 根占：2003 年 3 月<br>佐多：2004 年 3 月   |

## 2. 風車の被害状況と事故当時の風況

### 2.1 被害状況

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。

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, (撤去済の 7 号)<br>佐多 2, 9 号 |
| 可動式上カバーの損傷<br>(落下や飛散はなし) | 根占 2, 4, 5, 9 号                              |
| ラジエーターカバーが飛散             | 佐多 1, 7, 8 号                                 |
| 損傷なし                     | 佐多 3, 4, 5, 6, 10 号                          |



図 3 風車の被害状況

### 2.2 事故当時の風況

図 4 に事故当時の田代アメダスによる風速・風向データを示す。南大隅 WF 近辺では、20 日の 0:00 前に風速が最大となっている。また、最大風速を記録した後に風速が急減しており、台風が目付近を通過したことが予想される。

表 3 に事故当時の各地点の風速を示す。風車サイトの風速は、20 日 0:00 付近の最大風速データが保存されているものから推定している(佐多 5 号最大 37 m/s, 佐多 6 号最大 41 m/s, 佐多 8 号最大 45 m/s)。風車の設計風速 50 m/s に対し、事故当時のハブ高さの最大風速は 40 ~ 45 m/s 程度であったと推定される。また、式 (1)<sup>5)</sup> の高度換算式を用いて算出した最大風速の 10 m (基準風速高さ) 換算値は全て 25 ~ 29 m/s 程度であり、サイトの基準風速 40 m/s を超えていないと推定される。

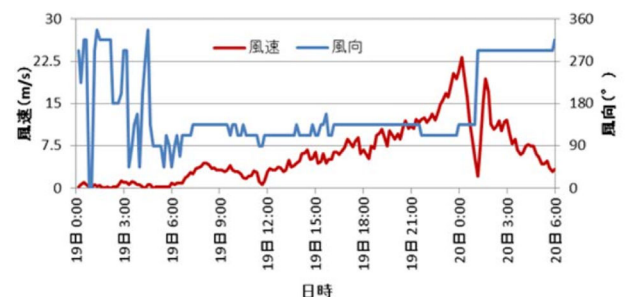


図 4 事故当時の風況 (田代アメダス)

$$V_z = V_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$n = 4$$

表 3 事故当時の各地点の風速

| 地点         | 標高    | 今回最大風速<br>(10 分平均)                        | 10 m 高<br>換算       |
|------------|-------|-------------------------------------------|--------------------|
| 田代<br>アメダス | 182 m | 23.2 m/s (6.5 m マスト)<br>40.4 m/s (ハブ高さ換算) | 25.8 m/s           |
| 根占         | 355 m | 40 ~ 45 m/s<br>(佐多風速より推定)                 | 25.6 ~<br>28.8 m/s |
| 佐多         | 438 m | 40 ~ 45 m/s<br>(ナセル風速計データ)                | 25.6 ~<br>28.8 m/s |

### 3. 事故原因調査

#### 3.1 CFD 解析

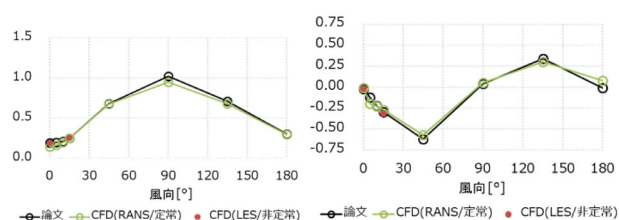
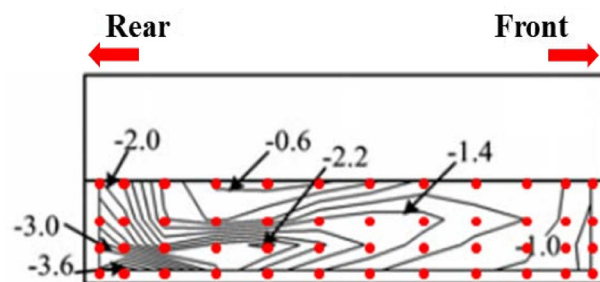
##### (1) 風洞実験との比較による CFD の精度検証

CFD で実機ナセルの風荷重を算出する前に、風洞実験との比較から CFD の精度検証を行った。使用した CFD ソフトウェアは STAR-CCM<sup>®</sup>である。解析条件を表 4 に示す。比較対象とした風洞実験は、参考文献<sup>7)</sup>にある Case4 とした。

図 5 に抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  の RANS (定常解析)、LES (非定常解析) による CFD 結果と風洞実験結果の比較を示す。 $C_D$ 、 $C_L$  ともに CFD 結果は風洞実験結果と概ね一致している。また、図 6 にナセル上面におけるピーク風圧係数  $C_p$  を示す。上面だけでなくナセルカバー表面全体で CFD 結果は風洞実験結果と同様の傾向を示しており、 $C_p$  の合計和は風洞実験結果の 101.6%であったため、概ね一致していると言える。ただし、図 6(d)の隅角部や中央部のように分布状況が風洞実験と CFD で異なる部分もあり、特に風洞実験よりも CFD で  $C_p$  が低い傾向を示す部分については応力を過小評価してしまう恐れがあるため、構造解析結果に注意する必要がある。

表 4 解析条件 (CFD 精度検証)

|       |      |                                                      |                                    |
|-------|------|------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 計算領域  |      | 2.6(W)×2.0(H)×6.0(D) [m]                             |                                    |
| メッシュ数 |      | 2600 万                                               |                                    |
| 乱流モデル |      | RANS                                                 | LES                                |
| 流入条件  | 風向   | 0, 5, 10, 15, 45, 90, 135, 180 [deg]                 | 0, 15 [deg]<br>( $C_D$ , $C_L$ 評価) |
|       |      | ( $C_D$ , $C_L$ 評価)                                  | 0, 5, 10, 15 [deg]<br>( $C_p$ 評価)  |
|       | 風速   | 8.0 m/s ( $C_D$ , $C_L$ 評価),<br>13.5 m/s ( $C_p$ 評価) |                                    |
|       | 乱流強度 | 13%                                                  |                                    |
| 流出条件  |      | 大気圧                                                  |                                    |
| 壁面条件  |      | No-Slip                                              |                                    |

図 5 風洞実験と CFD による  $C_D$ (左図)、 $C_L$ (右図)の比較

(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) 一致率 ((c) の値 / (b) の値) [%]

図 6 ピーク風圧係数  $C_p$  の比較 (ナセル上面)

##### (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、実機ナセルについて CFD 解析を行った。なお、前項では  $C_D$ 、 $C_L$  の評価に計算時間の短い RANS による解析も用いたが、ここでは精度が高く、風圧係数  $C_p$  を含めた精度検証のなされた LES による解析を行った。解析条件を表 5 に示す。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、流入風速条件に設定した。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 7 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、隅角部では流れが増速して負圧が発生していることが分かる。

表 5 解析条件（実機ナセル解析）

|       |      |           |
|-------|------|-----------|
| メッシュ数 |      | 3500 万    |
| 乱流モデル |      | LES       |
| 流入条件  | 風向   | 0°        |
|       | 風速   | 63.0 m/s  |
|       | 乱流強度 | 13%       |
| 流出条件  |      | 大気圧       |
| 壁面条件  |      | Free-Slip |

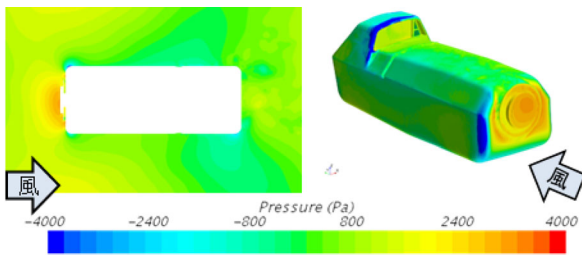


図 7 圧力分布（左図：ハブ中心部高さの断面図）

### 3.2 ナセルカバー材料試験

ナセルカバー材料試験は、FRP の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 8）。また、材料強度の方向依存性を考慮し、0、45、90° についてそれぞれサンプル数 3（N3）で試験を行った（図 9）。試験より得た材料特性を表 6 に示す。

材料特性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、評価値として採用した。フレームは、材料試験から材質を建築構造用鋼材 SN400 と特定し、降伏点を評価値として採用した。

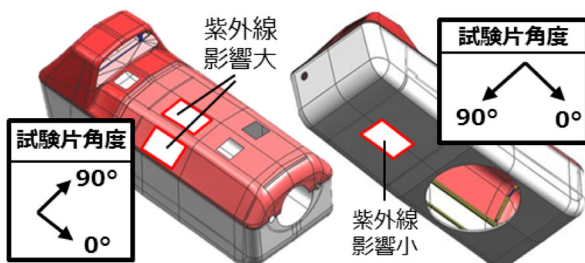


図 8 試験片採取箇所

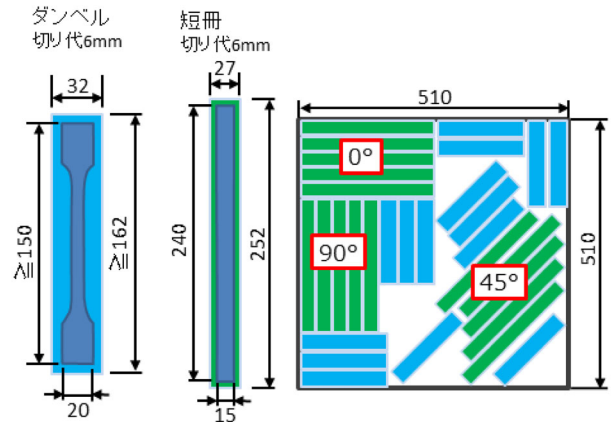


図 9 試験片切り出し寸法

表 6 試験より得られた材料特性  
（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<br>(SN400) | FRP   | FRP  |
| 降伏点 [MPa]  | 235             | -     | -    |
| 引張強さ [MPa] | 439             | 45.7  | 29.5 |
| 圧縮強さ [MPa] | -               | 138.9 | 62.0 |

### 3.3 構造解析

CFD で得られた風荷重分布（瞬時解）と材料試験による材料特性を FEM への入力値として用い、構造解析を行った。

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構造となっているが、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の有り・無しの 2 パターンで解析を行った。

なお、材料試験結果から実機 FRP 材は引張強さよりも圧縮強さの方が大きいことが予想されるため、事故原因究明のために行う本構造解析では、より降伏に至りやすい引張側のみを解析対象とした。

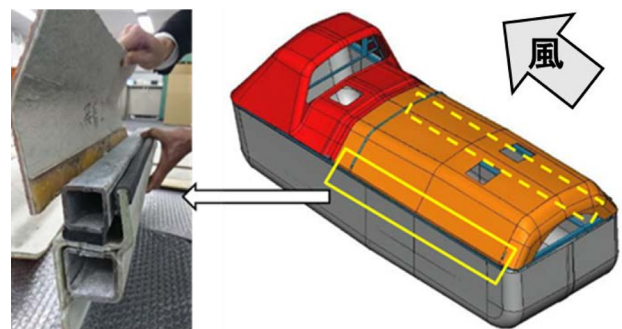


図 10 上カバー下端接着部の剥離



接着有りの場合のナセルカバーの変形状態を図 11、ナセルカバー応力を図 12、フレーム応力を図 13 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（ただし、今回の事故でフックの損傷は確認されていない）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 14、ナセルカバー応力を図 15、フレーム応力を図 16 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。実際、ヒンジ側フレームの破断による被害も確認されている（図 17）。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が生じた状態で風を受けることで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、ナセル上カバーで高応力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であったと考えられる。

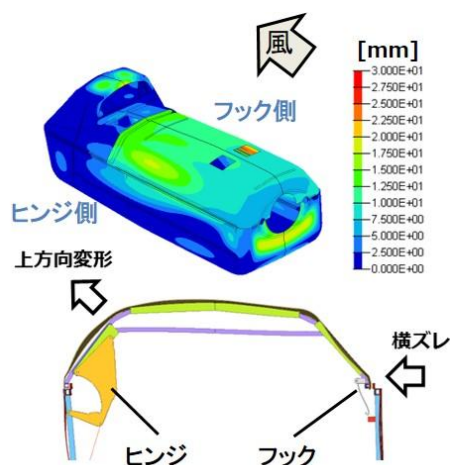


図 11 ナセルカバーの変形（接着有り）

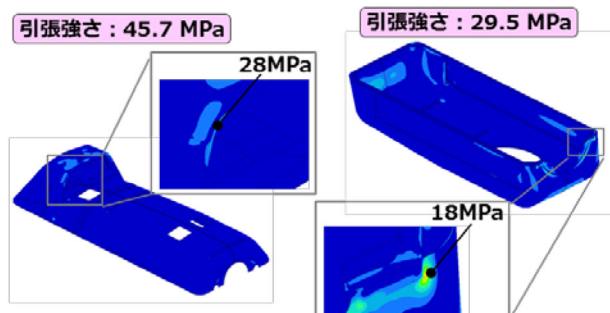


図 12 ナセルカバー応力（接着有り）  
（左：上カバー，右：下カバー）

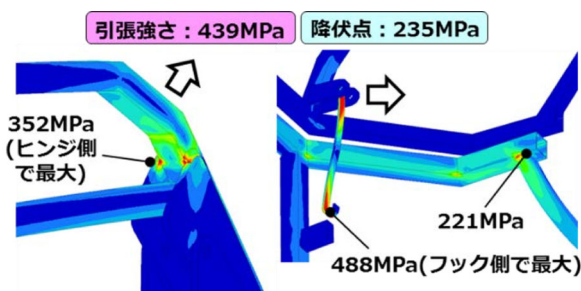


図 13 フレーム応力（接着有り）  
（左：ヒンジ部，右：フック部）

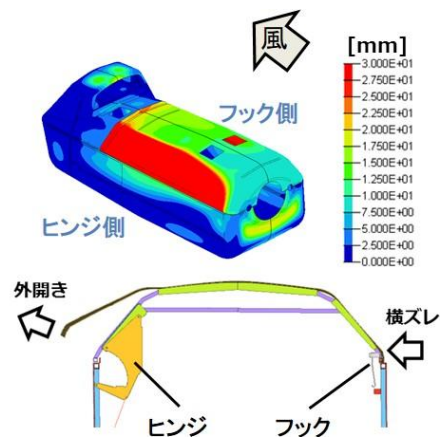


図 14 ナセルカバーの変形（接着無し）

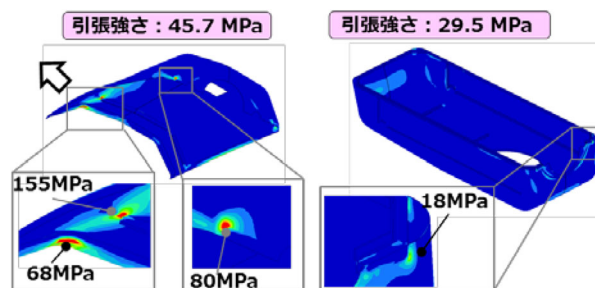


図 15 ナセルカバー応力（接着無し）  
（左：上カバー，右：下カバー）

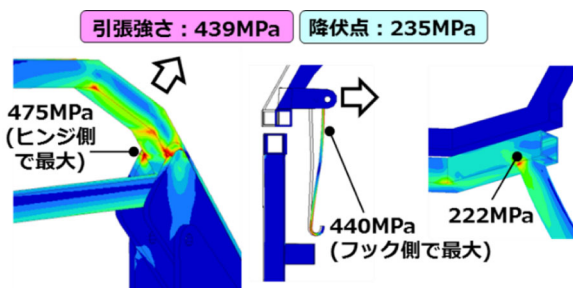


図 16 フレーム応力（接着無し）  
（左：ヒンジ部，右：フック部）



図 17 フレーム破断箇所（ヒンジ側，根占 8 号）

## 4. ナセルカバー強度対策

### 4.1 強度対策

前章で述べた事故原因を踏まえ、ナセルカバー飛散・損傷事故の再発防止策に向けてナセルカバーの強度対策を検討した。

考慮する風条件として、事故当時の最大風速 45 m/s（10 分平均）の 1.4 倍である 63 m/s を最大瞬間風速と推定したことを踏まえ、待機中（カットアウト後）の暴風を想定した Design Load Case(DLC)6.1<sup>5)</sup>（風速 73.1 m/s，風向 0°, ±15°）と待機中の故障を想定した DLC7.1（風速 58.5 m/s，風向 ±90°, 180°）を設定した。補強策はこれら二つの風条件に耐えるようなものを考えた。最終的なナセルカバー補強策を表 7、表 8 に示す。対策①～③は緊急的なナセルカバー補強策として、2017 年 7 月にすでに実施済みである。対策④～⑮は現在実施中である。

表 7 ナセルカバー補強策（上半）

| 部位 |      | 対策案                           |
|----|------|-------------------------------|
| 上半 | フレーム | ④ 鋼材寸法変更                      |
|    |      | ⑤ 前面と中央の間にフレーム 1 本追加          |
|    |      | ⑥ 既存フックの寸法変更                  |
|    |      | ⑦ フック構造を追加                    |
|    |      | ⑧ ラジエター側（後部側）のフレームのフック側に補強板追加 |
|    |      | ⑨ ヒンジの形状変更                    |
|    | カバー  | ⑩ FRP を新材料（7 層 5 mm）に変更       |
|    |      | ⑪ FRP を巻き込み構造とし、ボルト固定         |
|    |      | ⑬ ラジエターカバーとフレームの隙間を FRP で埋める  |

表 8 ナセルカバー補強策（下半）

| 部位 |      | 対策案                         |
|----|------|-----------------------------|
| 下半 | フレーム | ① 前面アーチ部に補強板追加              |
|    |      | ② 前面ダンパ取付部近傍に補強板追加          |
|    |      | ③ 中央ダンパ取付部近傍に補強板追加          |
|    | カバー  | ⑭ 中央ダンパ付近に FRP シート貼付        |
|    |      | ⑮ フレーム巻き込み部全域に実機の FRP 板厚を反映 |

主な補強策として、まず、上半フレームでは寸法変更、本数追加に加え、上カバーの FRP 材を新材料に変更した（図 18）。上下構造連結点では、フックの寸法変更と新たなフック構造の追加を行った（図 19）。上半カバーとフレーム間では FRP を巻き込み構造とし、ボルトでの固定を追加した（図 20）。ラジエターカバーでは仕切り板の板厚を増し、カバーとフレームの隙間を樹脂で埋めた（図 21）。

### ■ 上半全体構造

#### 中央フレーム追加、FRP 全周巻き込み



図 18 上半全体構造における補強策

### ■ 上下構造の連結

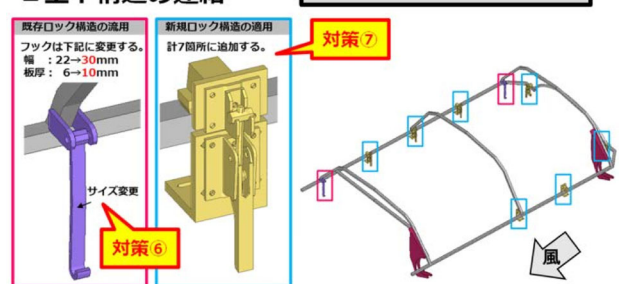


図 19 上下構造の連結における補強策

#### 対策表⑪ FRP 巻き込み構造+ボルト固定

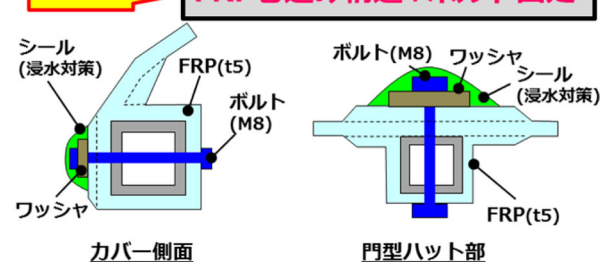


図 20 上半カバーとフレーム間における補強策

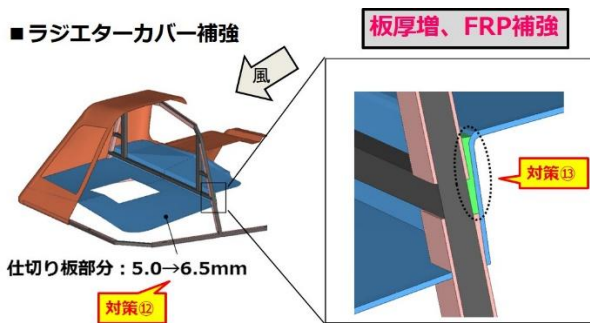


図 21 ラジエターカバーにおける補強策

## 4.2 CFD 解析と材料試験

今回施したナセルカバー強度対策の妥当性を検証するため、FEM による構造解析を行った。事故原因究明時と同様に、CFD で得た風荷重分布と材料試験で得た材料特性を FEM への入力値として用いた。

CFD による風荷重の算出として、強度対策を施したナセルカバー形状について LES 解析を行った。ここで使用した CFD ソフトウェアは事故原因究明の時に用いたものと同じく STAR-CCM+である。風条件は、DLC6.1(風速 73.1 m/s, 風向 0°, ±15°)と DLC7.1(風速 58.5 m/s, 風向 ±90°, 180°)と設定して CFD 解析を行い、ナセル各部に作用する風荷重を算出した。

材料試験では、0°, 45°, 90°の 3 方向でそれぞれ 3 サンプルによる圧縮と引張試験を実施した。今回は詳細な強度評価をするため、評価値の算出方法は GL2010 準拠のものとした。まず各方向で 3 サンプルの（平均値 - 2.59 × 標準偏差）で求まる 95%確率値を FRP の特性値として算出し、3 方向の特性値の中で最小のものを構造解析結果の評価値として採用した。なお、上カバーは新材料、下カバーは実機から採取した FRP で試験し計算した値を用いた。

フレームの強度は、GL2010 基準で評価をするため、鋼構造設計基準に定められた SN400 の降伏点に、JIS 材を用いる場合に認められた 1.1 倍を施した値を、新たな降伏点の評価値として採用した。表 9 に材料特性を示す。

表 9 試験より得られた材料特性（新評価値）

|            | フレーム            | 上カバー  | 下カバー |
|------------|-----------------|-------|------|
| 材質         | スチール<br>(SN400) | FRP   |      |
|            |                 | 新材料   | 実機   |
| 降伏点 [MPa]  | 258.5           | -     | -    |
| 引張強さ [MPa] | 439             | 82.8  | 24.3 |
| 圧縮強さ [MPa] | -               | 150.5 | 48.3 |

## 4.3 構造解析結果評価

構造解析結果の評価には、GL2010 準拠の安全率を適用した。風況条件によって定まる荷重安全係数と各部位によって定まる材料安全係数の積を今回適用する安全係数と定めた。荷重安全係数は DLC 条件によって定められている。材料安全係数は部分安全係数の他、経年劣化、温度劣化、ハンドレイアップ（積層成形法）、後硬化処理の有無で定まる係数の積で表される（表 10）。

本評価で適用した安全係数をそれぞれ表 11 に示す。なお、下カバーFRP は台風通過時に多方向から DLC7.1 相当の強風を受けたと想定されるが、下半カバーはすべて健全であったため、今回の補強策でより強度が増すことが想定される。よって、本研究では解析を省略している。

表 10 材料安全係数の詳細

|          | フレーム | 上カバー | 下カバー |
|----------|------|------|------|
| 部分安全係数   | 1.10 | 1.35 | 1.35 |
| 経年劣化     | -    | 1.09 | 1.09 |
| 温度劣化     | -    | 1.10 | 1.10 |
| ハンドレイアップ | -    | 1.20 | -    |
| 後硬化処理    | -    | 1.10 | -    |
| 材料安全係数   | 1.10 | 2.14 | 1.62 |

表 11 構造解析評価に適用した安全係数

| 設計荷重   | 荷重安全係数(A) | 材料安全係数 (B) |       | 安全係数 (A×B) |
|--------|-----------|------------|-------|------------|
| DLC6.1 | 1.35      | フレーム       | 1.10  | 1.485      |
|        |           | 上カバー       | 2.14  | 2.890      |
|        |           | 下カバー       | 1.62  | 2.190      |
| DLC7.1 | 1.10      | フレーム       | 1.10  | 1.210      |
|        |           | 上カバー       | 2.14  | 2.350      |
|        |           | 下カバー       | 評価しない |            |

表 12 新評価値に対する最大応力の裕度

| ケース     |      | 裕度   |          |      |          |      |
|---------|------|------|----------|------|----------|------|
|         |      | フレーム | FRP 上カバー |      | FRP 下カバー |      |
|         |      |      | 引張       | 圧縮   | 引張       | 圧縮   |
| DLC 6.1 | 0°   | 1.15 | 1.38     | 2.00 | 1.00     | 1.84 |
|         | +15° | 1.12 | 1.23     | 1.92 | 1.04     | 1.60 |
|         | -15° | 1.18 | 1.27     | 1.89 | 1.04     | 1.71 |
| DLC 7.1 | +90° | 1.33 | 1.00     | 1.66 |          |      |
|         | -90° | 1.10 | 1.01     | 1.68 |          |      |
|         | 180° | 1.88 | 2.67     | 5.76 |          |      |



表 12 に各条件の降伏点に対する構造解析で得た最大応力の裕度を示す。構造解析の結果、すべてのケースにおいて裕度は1以上であり、新たに製作する上カバーが損傷しないことを確認した。また、下カバーは今回の台風（DLC7.1 相当）で損傷していないが、DLC6.1 についても損傷しないことを確認した。構造解析で得られた結果の一例として、風速 73.1 m/s、風向 +15° の DLC6.1 条件での発生応力図を図 22 に示す。部分的に高応力が発生する箇所が見られるが、強度を超えるような応力は発生しなかった。

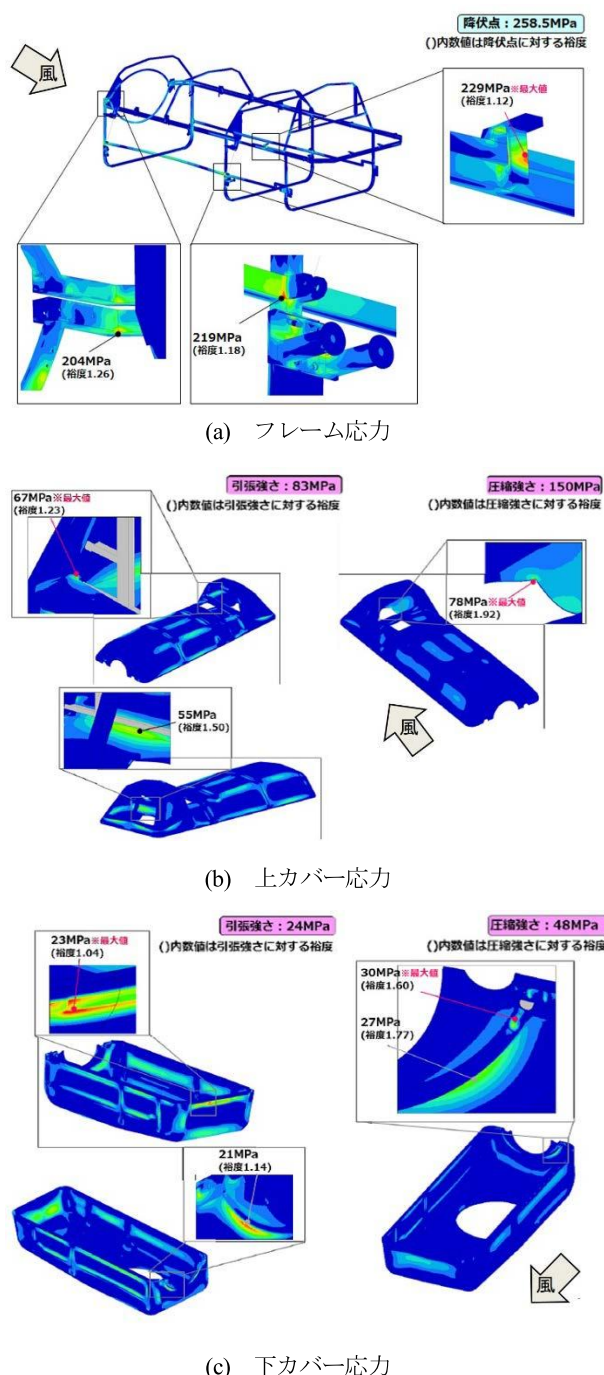


図 22 DLC6.1 (風向+15°) 条件の応力発生図

## 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・損傷事故の再発防止に向け、まず、台風の強風により南大隅 WF の風車が受けた被害の状況と事故当時の風況について調査・確認した。近傍の田代アメダスとナセル風速風向計のデータにより、風車の設計風速 50 m/s に対し、事故当時のハブ高さ最大風速(10 分平均) は 40~45 m/s だと推定された。

次に、事故要因究明を試みた。風洞試験との比較から精度検証がなされた CFD を用いて、事故当時の実機ナセルにかかる風荷重を算出した。これと実機ナセルから採取した FRP を材料試験して得られた材料特性を入力とし、FEM による構造解析を行った。その結果、上カバー・フレーム接着部の劣化・剥離が事故の主要因であること、接着が無い場合は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、ナセル上カバーで高応力が生じて飛散・損傷に至ることが確認された。

最後に、これら事故要因を踏まえ、材質や構造の変更といったナセルカバー補強策を示した。補強策を施したナセルカバーで事故要因究明同様、FEM による構造解析を行ったところ、DLC6.1、DLC7.1 といった風条件であっても損傷しないことが確認された。

よって、現在はこれらの強度対策を施したナセルカバーを新たに設計、製作し、既存のものと順次交換をして、事故の復旧を進めているところである。

## 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) 経産省, 第 10 回産業構造審議会 保安分科会 電力安全小委員会 新エネルギー発電設備事故対応・構造強度ワーキンググループ, 資料 4, 2016.
- 4) NORDEX, N60/1300 kW, [http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex\\_N60\\_EN.pdf](http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex_N60_EN.pdf)
- 5) IEC 61400-1 ed.3, Wind turbines – Part 1: Design requirements, 2005.
- 6) CD-adapco ウェブページ, [http://www3.cd-adapco.com/translations/ja\\_jp/products/star\\_ccm\\_plus/index.html](http://www3.cd-adapco.com/translations/ja_jp/products/star_ccm_plus/index.html)
- 7) 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.