

白馬ウインドファームの ブレード折損事故について

2019年 7月 12日

白馬ウインドファーム株式会社

目次

1. 風力発電所の概要
2. 事故の概要
3. 風車の破損状況と分析
4. 事故要因の分析
5. 風向計損傷の原因検討
6. 台風21号の強風解析
7. ブレードの構造解析
8. ブレード折損の推定原因
9. 再発防止対策

1. 風力発電所の概要

事業者：白馬ウインドファーム株式会社

住所：和歌山県日高郡日高川町大字平川
字小山1136-2

設備容量：1,500kW × 20基 30MW

運転開始：2010年3月

形式：GE社 GE1.5sle

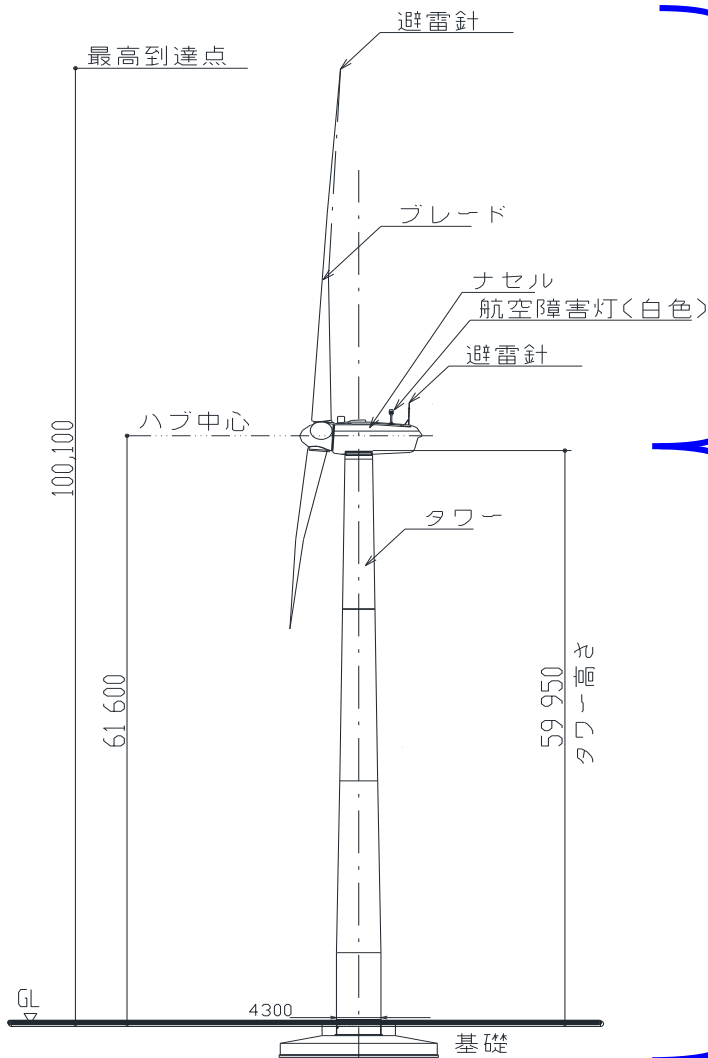
IECウインドクラス：S($V_{e50} = 55\text{m/s}$)

ブレードの製造：LM社 ブレード長：37.25m

タワーの製造：東国S&C(韓国)ハブ高：61.6m

1. 風力発電所の概要

当該風車の耐風速



ナセル・ハブ・ブレード

設計上の耐風速: IEC Class S

$V_{e50}=55\text{m/s}$ (3秒平均)

タワー・アンカーリング・基礎

設計風速: 62.4m/s (10分平均)

地形的要因などを考慮して、

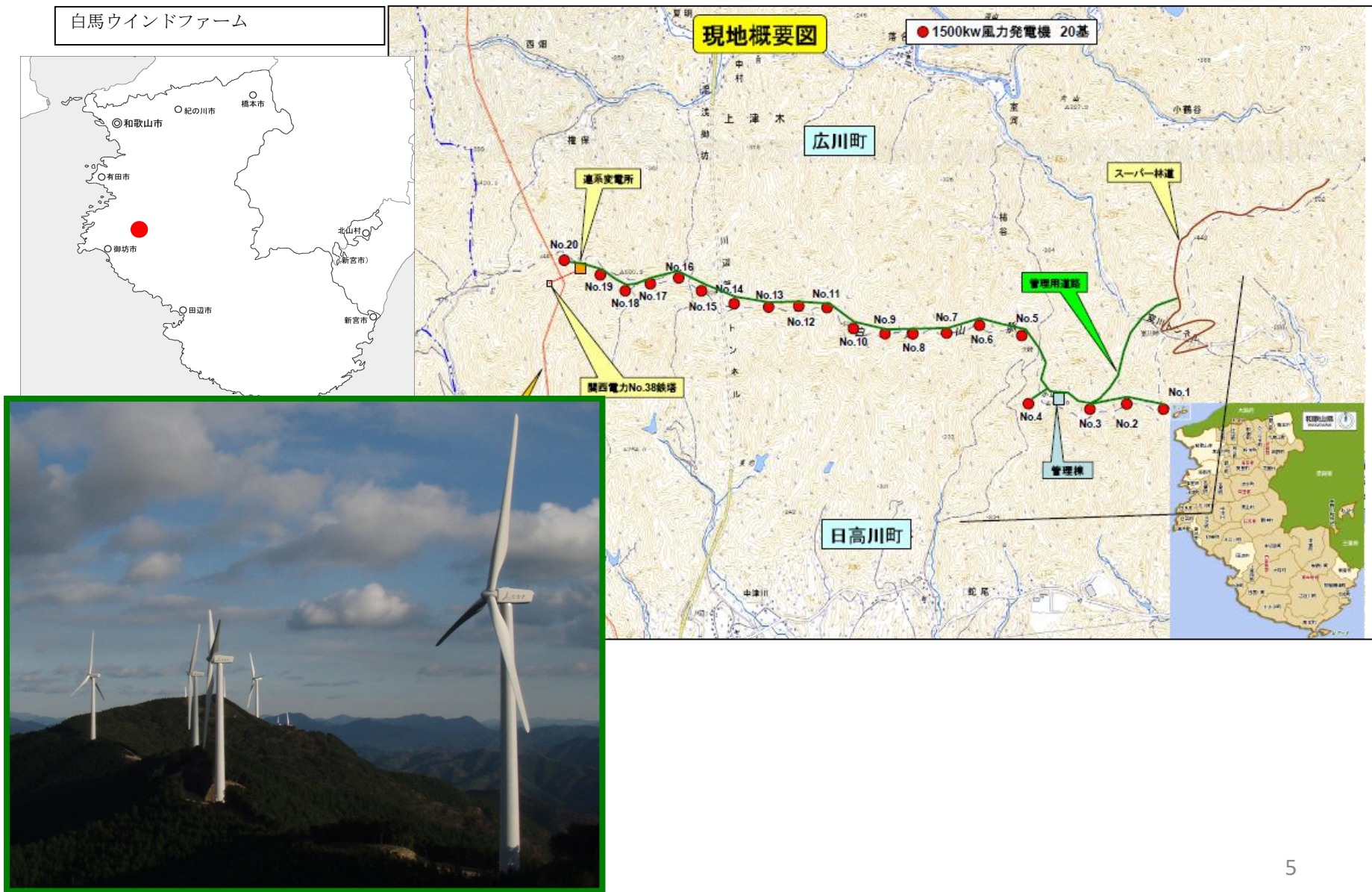
$V_0=34\text{m/s}$ を増速させた風速

* 構造計算上、タワー・アンカーリング・基礎の耐風速を検証した。

- ・タワー 約 80m/s (正対)、約 66m/s (横風)
- ・アンカーリング 約 77m/s (正対)、約 66m/s (横風)
- ・基礎 約 75m/s (正対)、約 65m/s (横風)

風に正対する場合は、 75m/s (10分平均)に耐える。

1. 風力発電所の概要



2. 事故の概要(17号機)

2018年度 定期事業者検査2018年4月9日～2019年3月15日 実施。

2018年9月4日

08:31 ストームシャットダウンで風車停止。

(平均風速10分 22.5m/s、30秒25.0m/s、3秒 27.0m/sで自動停止)

11:00 台風21号は室戸岬沖を中心気圧945hpa、最大風速 45m/s、
最大瞬間風速 60m/s非常に強い勢力で近畿地方に接近

12:00～13:30 瞬時電圧低下が19回発生(サイト全体)

12:31 風向偏差が一定

12:37 エラが多発

12:43 ブレード3枚を映像で確認

12:43～13:20 ブレード折損

13:20 ブレード1枚折損を映像で確認

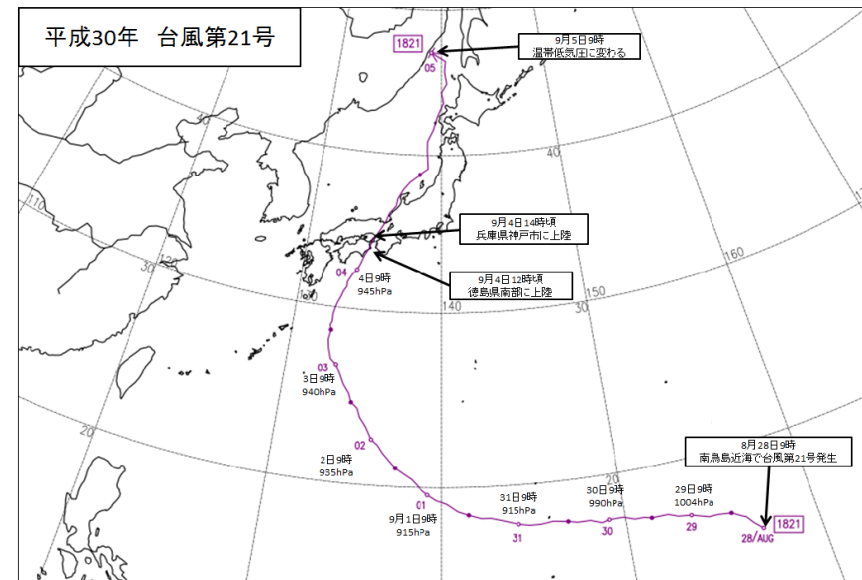
13:51 関西電力送電線77kV停電

2018年9月5日

ストームシャットダウン発生時の点検(運転細則)

08:00 ブレード1枚折損を確認

15:02 77kV52R遮断器投入、復電



2. 事故の概要

折損したブレードは、17号機から北方向200～250mの森林に飛散



3. 風車の破損状況と分析 折損したブレードの分析

17号機のNo.1ブレードは、現地確認の結果、破断面と亀裂が斜めに発生していることから、「**曲げ**」と「**ねじり**」を受けたものと推測する。

SSのシェルに発生した亀裂



内部桁の破損状況



破断面



約8m

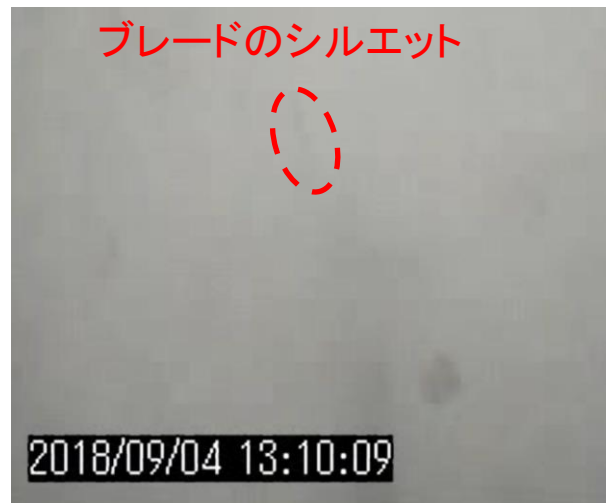
3. 風車の破損状況と分析 監視カメラの映像分析

- ① 12:43:51 ブレード3枚のシルエットを映像で確認。
- ② 13:11:11 ブレード1枚のシルエットが見えるタイミングが等間隔ではなく2秒後→4秒後→2秒後→4秒後とブレードが1枚少ないタイミングとなる。この時点では既にブレードは折損していたと考える。
- ③ 13:20:02 ブレード1枚が折損していることを映像で確認。



①

12:43:51 (+62s)



②

13:11:11 (+62s)



③

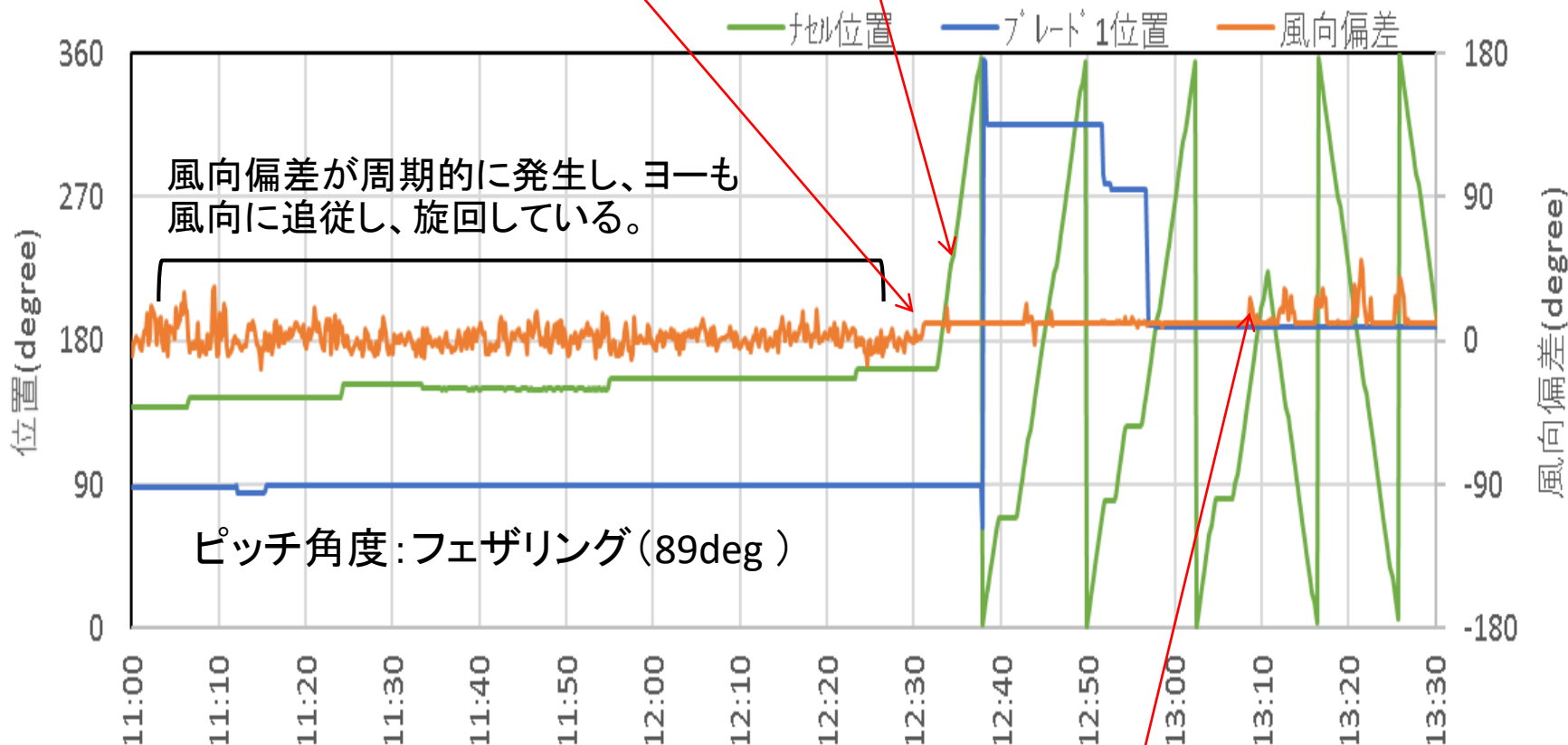
13:20:02 (+62s)

監視カメラ映像(時間は+62秒が正時間)

3. 風車の破損状況と分析 SCADAデータの分析

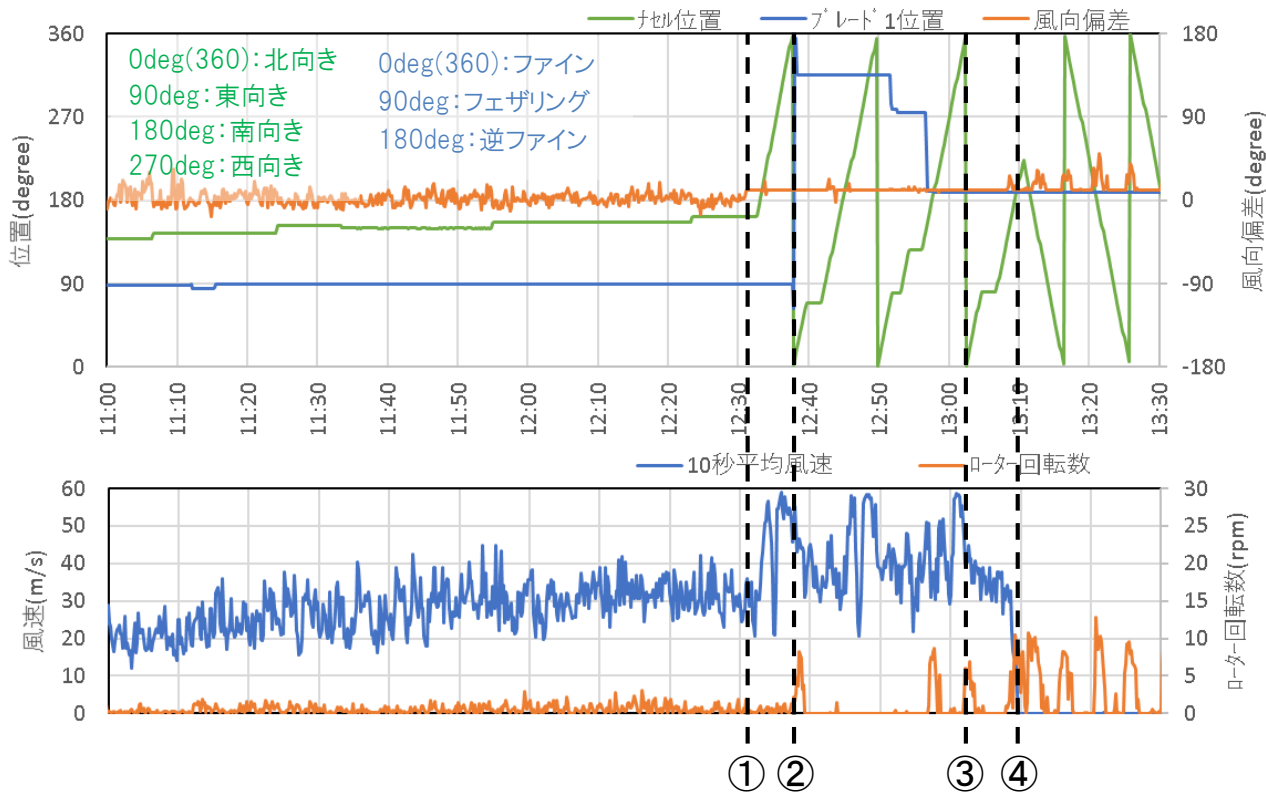
風向偏差が一定(11deg)となる。

ヨーが一定速度で右旋回を始めた。



ヨーが旋回数の上限に達したため左旋回(逆回転)する。

3. 風車の破損状況と分析 SCADAデータの分析



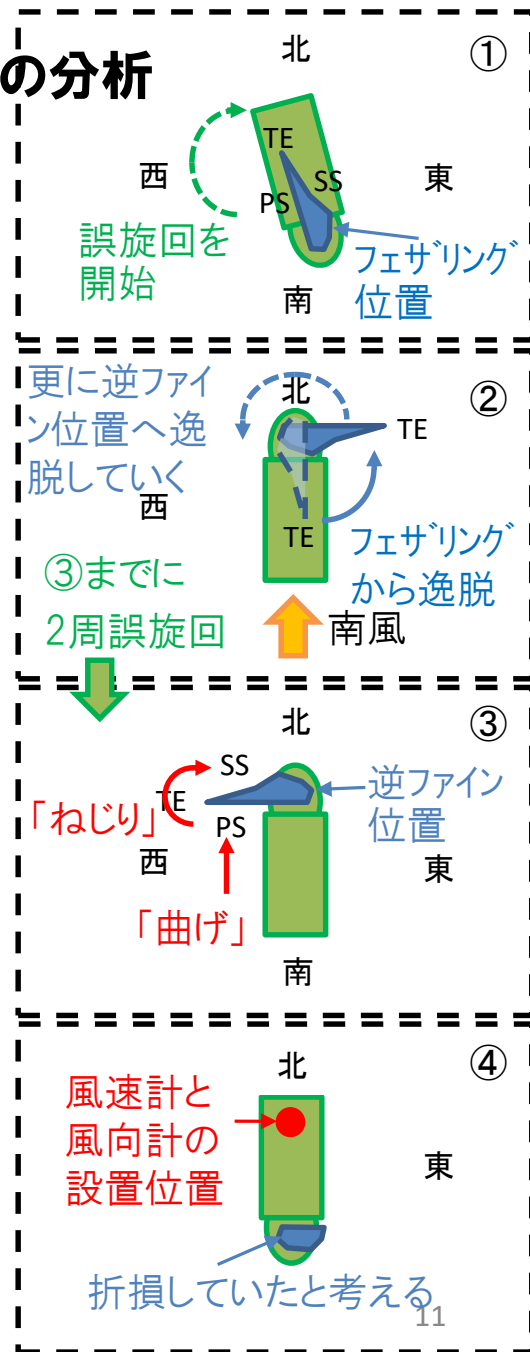
① 12:31 風向偏差が一定(11deg)となる。

以降、ナセルは誤旋回を開始する。(風速35.26m/s)

② 12:37 ナセルが北側を向き、ブレードはTEから風を受け、フェザリング位置から逸脱する。以降、ローターが断続的に回転する。

③ 13:02 ブレード1は「曲げ」と「ねじり」を受ける。(次ページに詳細)

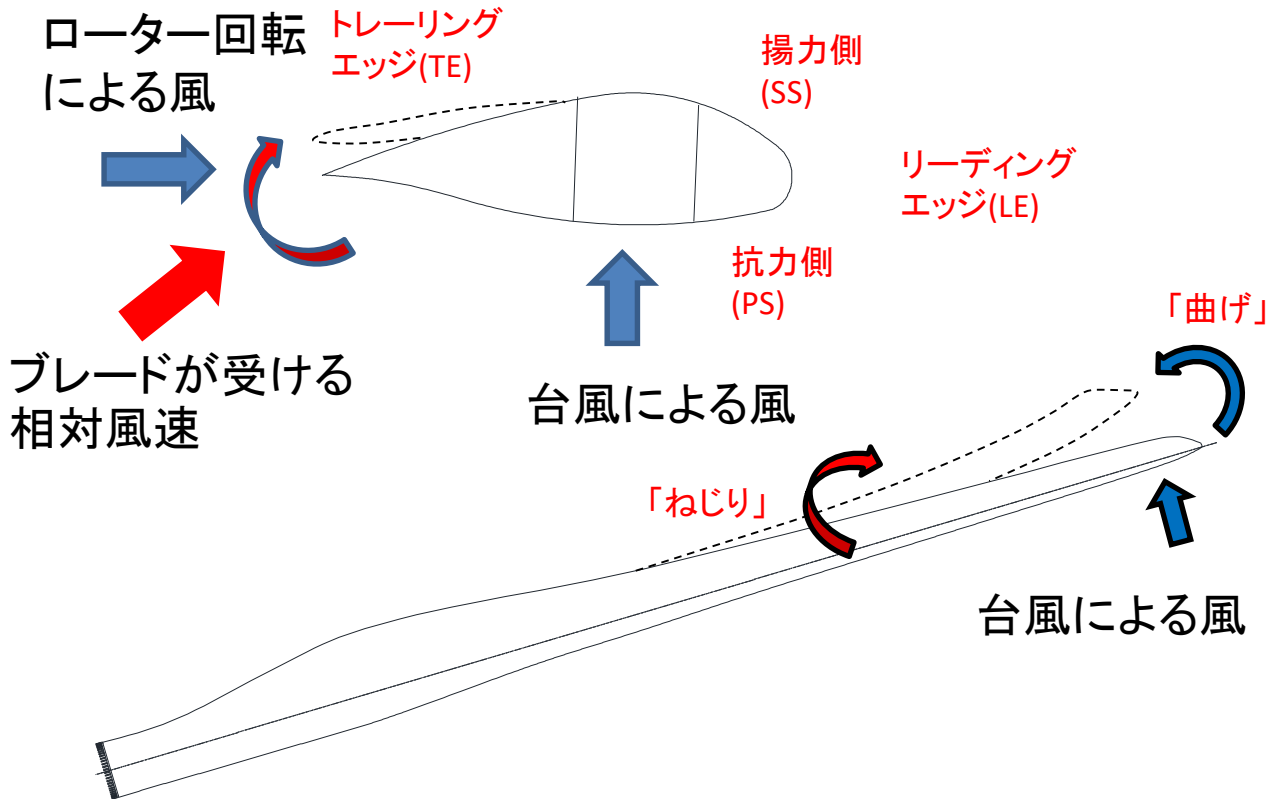
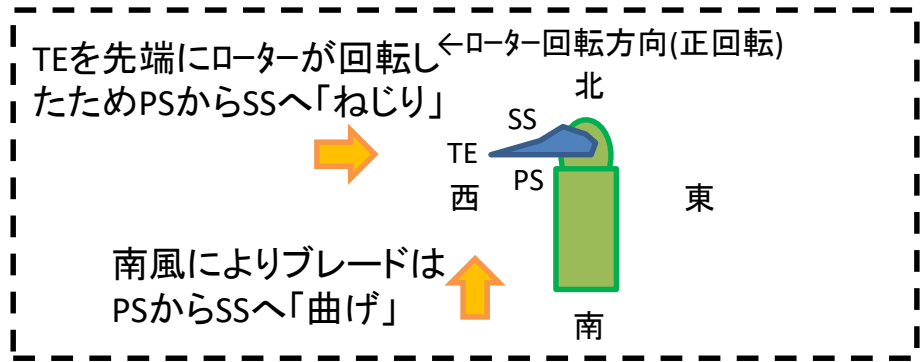
④ 13:09 風速計からの信号が途絶えて0m/sとなる。



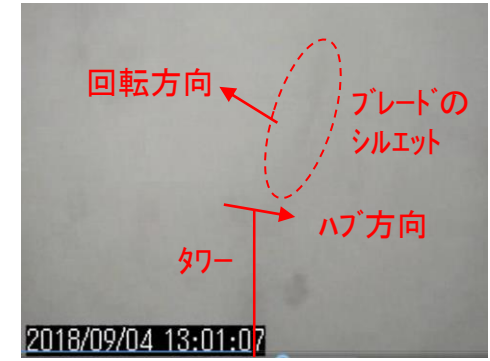
3. 風車の破損状況と分析 SCADAデータの分析

③のナセルおよびブレード1の位置は右図となり、「**曲げ**」と「**ねじり**」を受けた状態となっている。

③の13:02以降に**ブレード1は折損**したと考える。

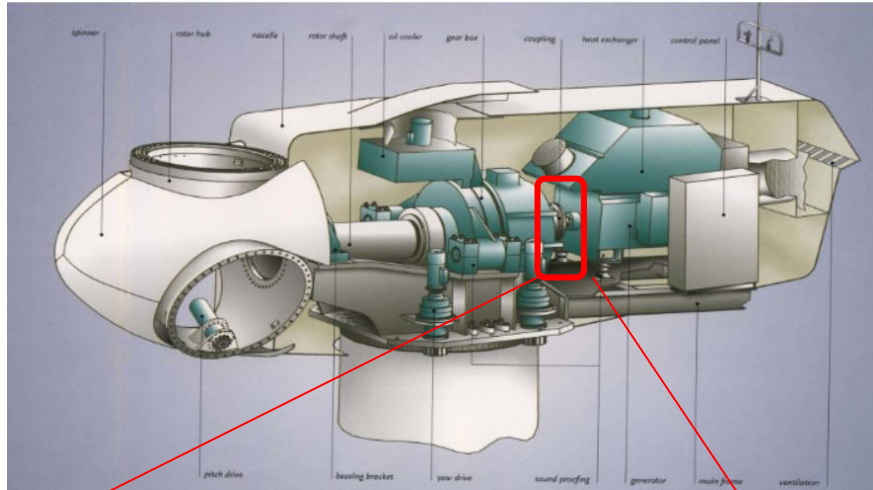


ローター回転数: 6.03rpm
 ※監視カメラの映像より正回転していた



13:02:09(+62s)

3. 風車の破損状況と分析 ローター2次ブレーキシステム



油圧式アクティブブレーキシステム
作業時および風車エラー時に、ローターの高速軸(2次)のディスクブレーキを作動し、ローター回転を停止させる



ブレーキキャリパが損傷
(17号機)

2016:12

3. 風車の破損状況と分析 全風車の状況分析

※1：赤字＝耐風速超過(10分平均値：42.5m/s・3秒平均値：55.0m/s-GE1.5sleクラスS)

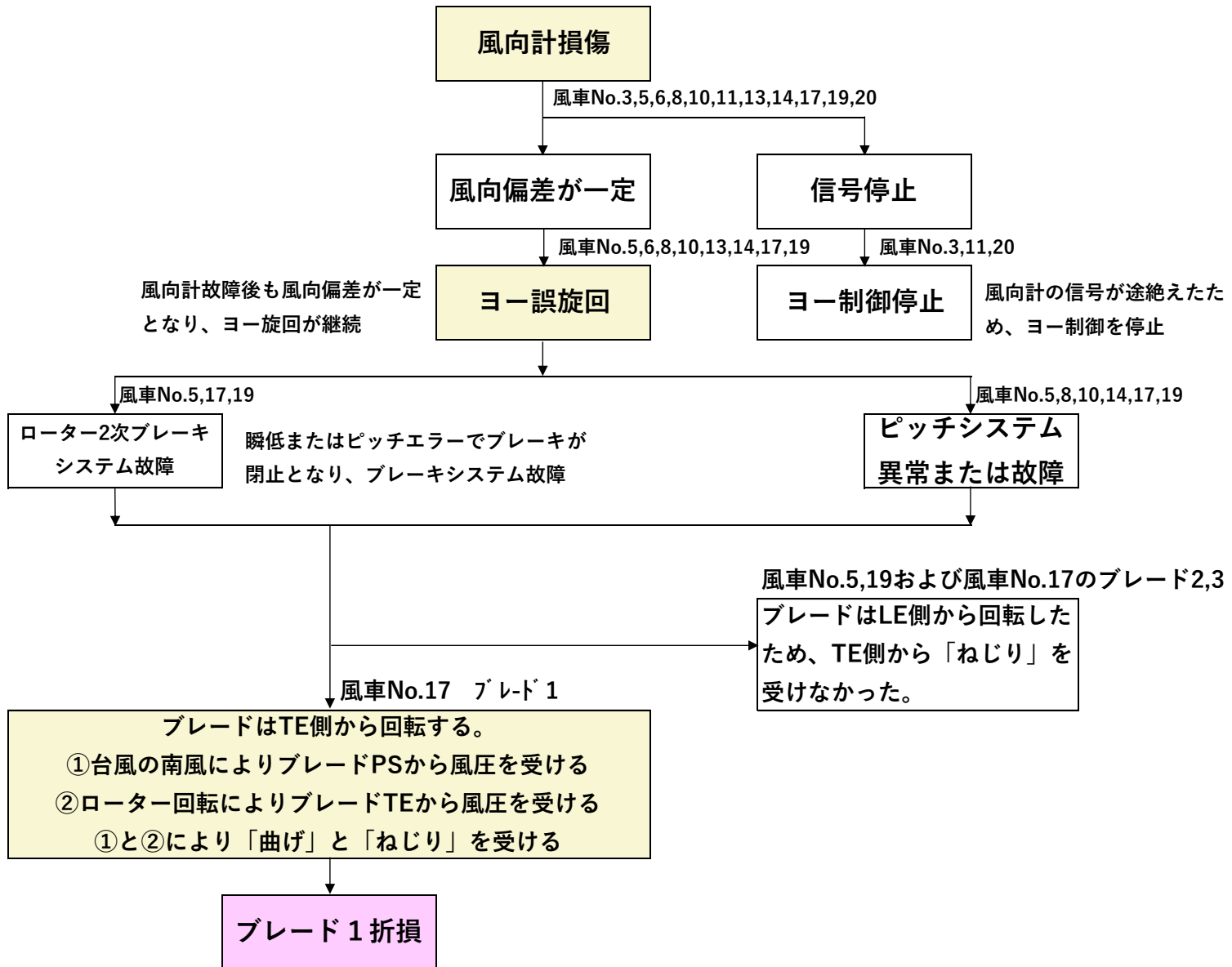
※2：異常＝後に正常復帰する、故障＝後に正常復帰しない

※3：△＝運転可能、軽微な傷有り[判定はGE社の社内基準による]

風車No	最大風速(m/s) ^{※1}		ブレード		風速計	風向計	ヨー制御		ピッチシステム ※2	ローター 2次ブレーキ ※2
	10分平均	10秒平均	外観 ^{※3}	UT検査	状況	状況	状況	誤旋回数		
1	34.97	-	△	○	○	○	○	○	○	○
2	41.87	-	△	○	○	○	○	○	○	○
3	31.75	48.2	△	○	○	損傷	動作停止	○	○	故障
4	36.05	52.83	△	○	○	○	○	○	○	○
5	32.13	57.75	○	○	○	損傷	誤旋回	1回未満	異常	故障
6	38.22	-	△	○	○	損傷	誤旋回	1回未満	○	○
7	33.17	-	△	○	○	損傷(軽微)	○	○	○	○
8	26.68	-	△	○	○	損傷	誤旋回	1回未満	故障	○
9	32.24	-	△	○	○	○	○	○	○	○
10	43.87	59.13	△	○	○	損傷	誤旋回	2回未満	異常	○
11	43.43	53.84	△	○	○	損傷	動作停止	○	○	○
12	37.42	53.98	△	○	○	○	○	○	○	○
13	44.36	58.99	△	○	○	損傷	誤旋回	2回未満	○	○
14	45.08	59.25	△	○	○	損傷	誤旋回	3回未満	故障	○
15	36.58	49.62	△	○	○	○	○	○	○	○
16	36.28	44.86	△	○	○	○	○	○	○	○
17	41.92	58.86	折損	-	損傷	損傷	誤旋回	5回	故障	故障
18	30.92	43.16	△	○	○	○	○	○	○	○
19	43.80	59.04	△	○	○	損傷	誤旋回	2回未満	異常	故障
20	37.91	47.24	△	○	○	損傷	動作停止	○	○	○

○＝異常なし

3. 風車の破損状況と分析 ブレード折損の分析



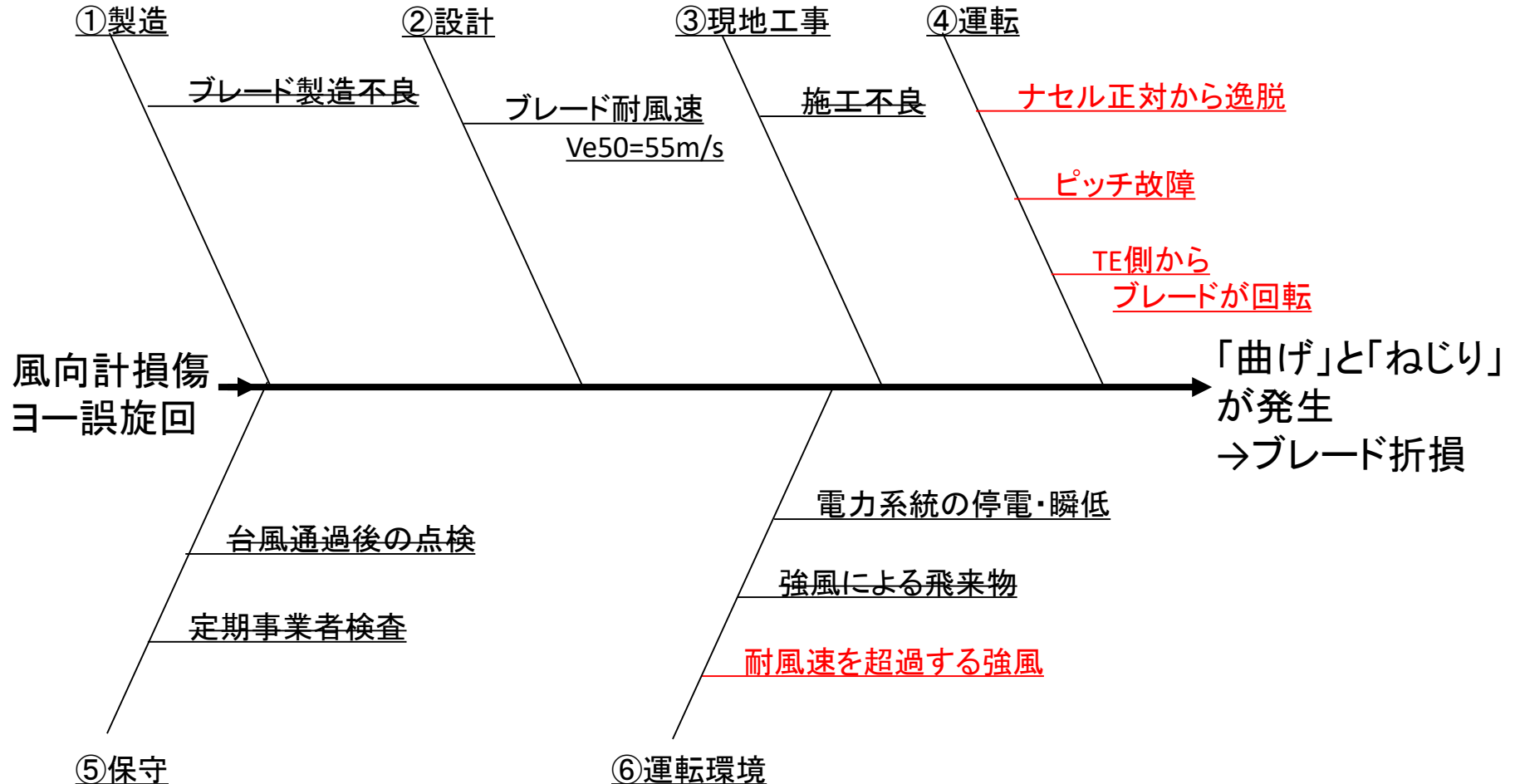
4. 事故要因の分析1

17号機の風向計損傷とヨ一誤旋回に至る要因分析

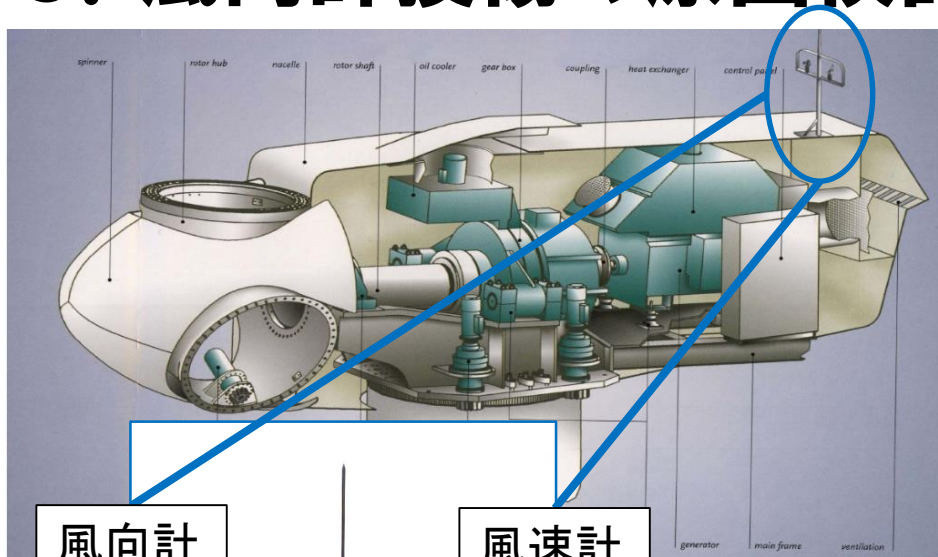


4. 事故要因の分析2

17号機のブレード折損に至る要因分析

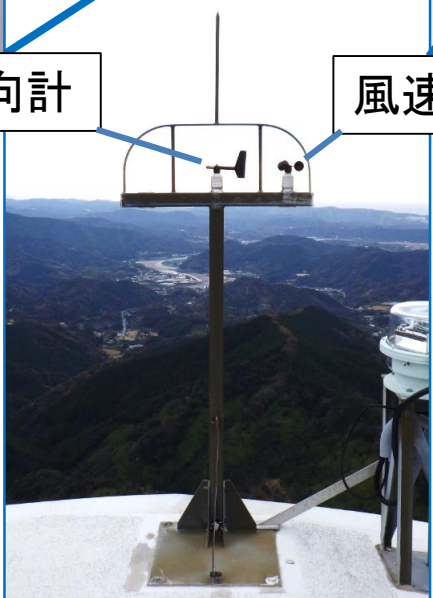


5. 風向計損傷の原因検討 損傷状況



風向計

風速計



① 正常な状態の風向風速計※



5号機



14号機



17号機



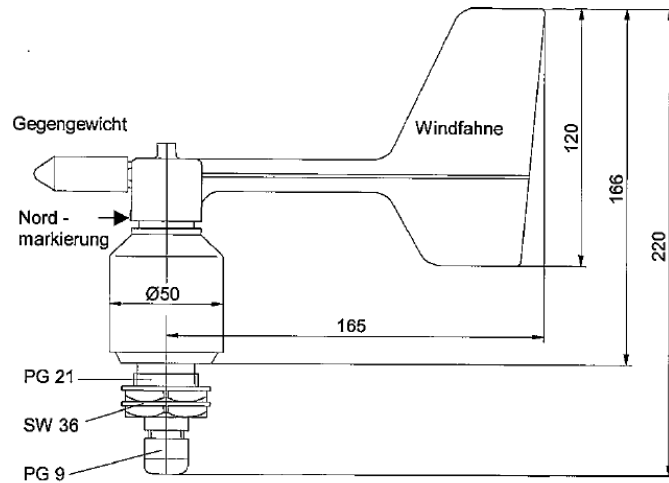
20号機

② 風向計の損傷状況

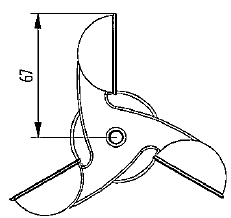
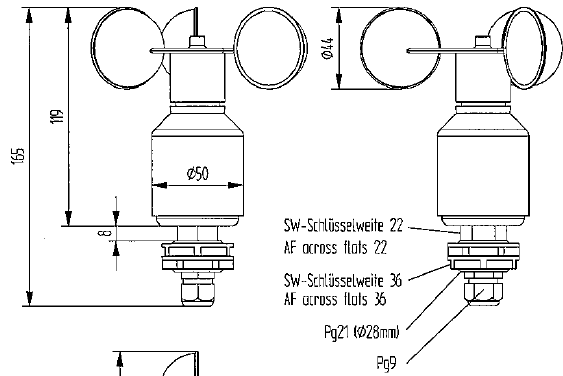
※2018年度 定期事業者検査を6月22日～8月21日に実施。
風向計・風速計に異常はなかった。

5. 風向計損傷の原因検討

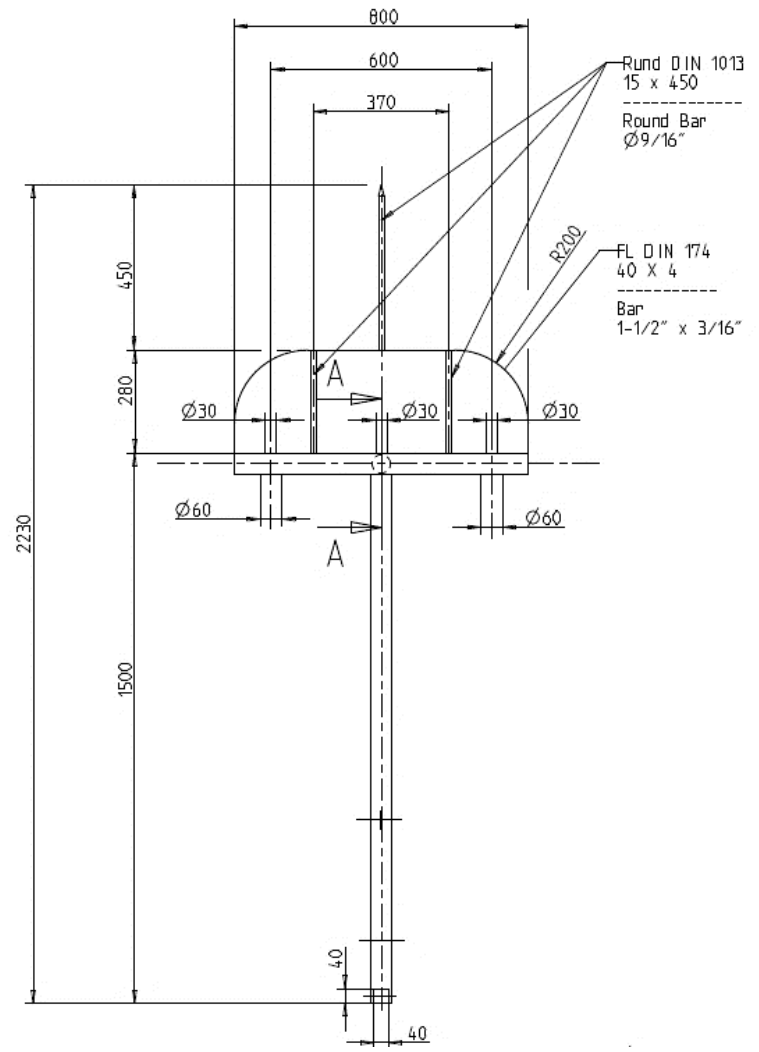
風車の風向・風速計および架台



風向計



風速計

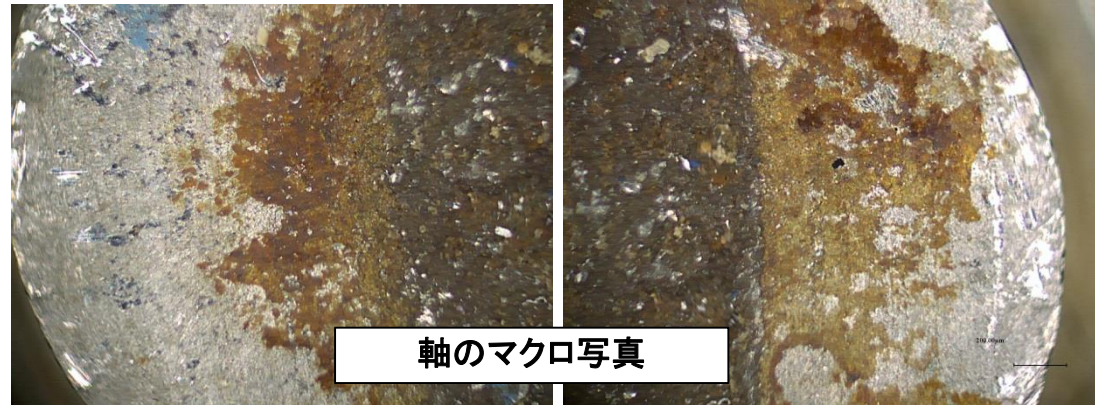


風向風速計用の架台

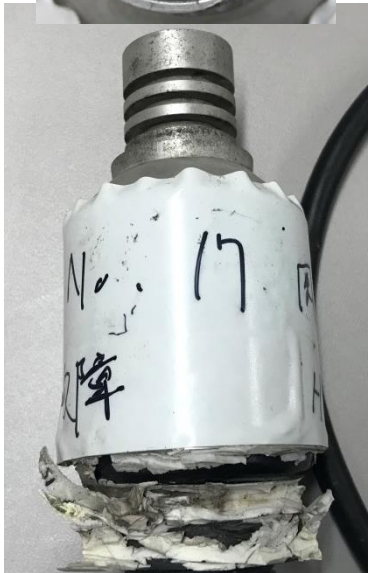
5. 風向計損傷の原因検討 破断面の精査

風向計の破断した軸を走査式電子顕微鏡(SEM)で観察したが、ストライエーションなど疲労の兆候は発見されなかった。瞬間的に破断したと考える。

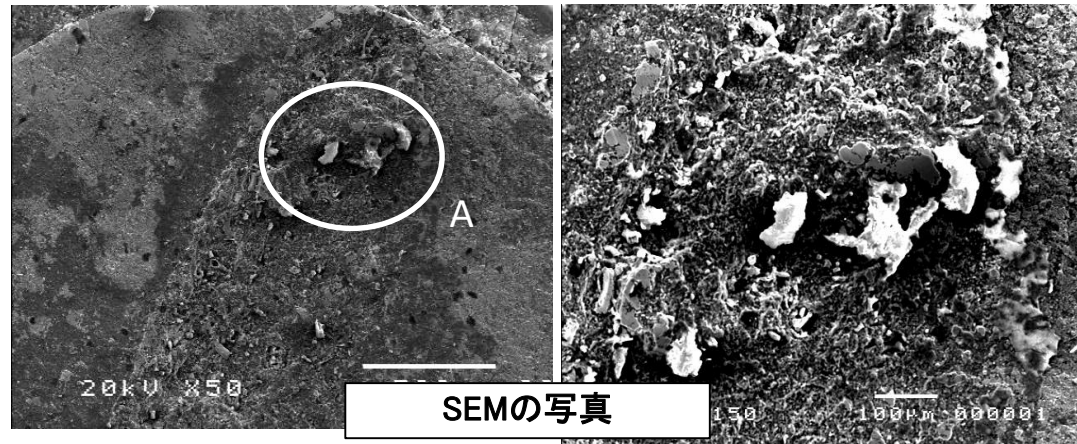
風向計の軸



軸のマクロ写真



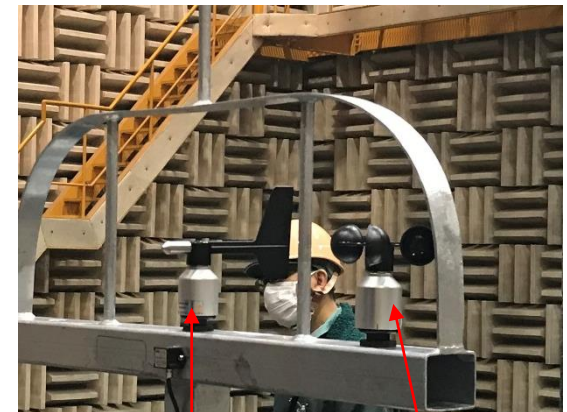
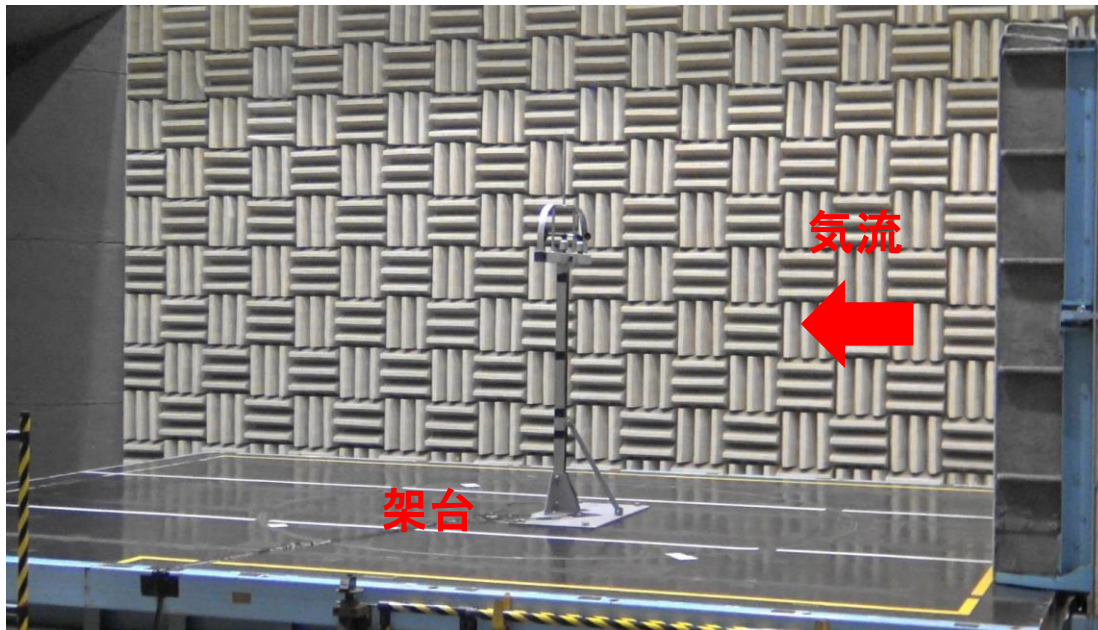
損傷した風向計



SEMの写真

5. 風向計損傷の原因検討 風洞実験 (鉄道総研 風洞技術センター)

- ・風速80m/sでも風向計・風速計に損傷は発生しなかった。
- ・風速80m/sでも風向計・風速計の架台に異常はなかった。
- ・風向計は、風速70m/sからフラッタリングが発生した。



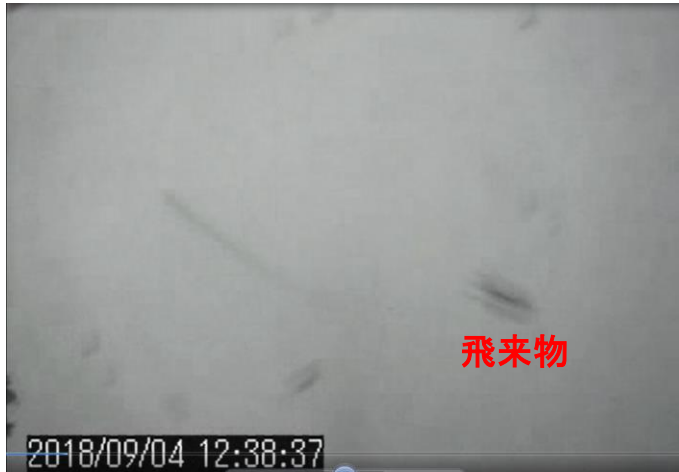
風向計

風速計

- ・ 17号機の風向計は、風速35.26m/sで損傷しているが、フラッタリングによる損傷の可能性は低い。
- ・ 17号機の架台は、風洞実験の結果から強風で倒壊した可能性はない。このことより、ブレードの破損物が衝突し倒壊したものとする。

5. 風向計損傷の原因検討 飛来物の状況

- ・監視カメラの映像(一例として14号機)より、多くの飛来物が視認できる。



- ・台風通過後のブレード点検では、飛来痕(運転可能、軽微な傷有り)がブレードの大半にみられた。一例として15号機の飛来痕を下図に示す。

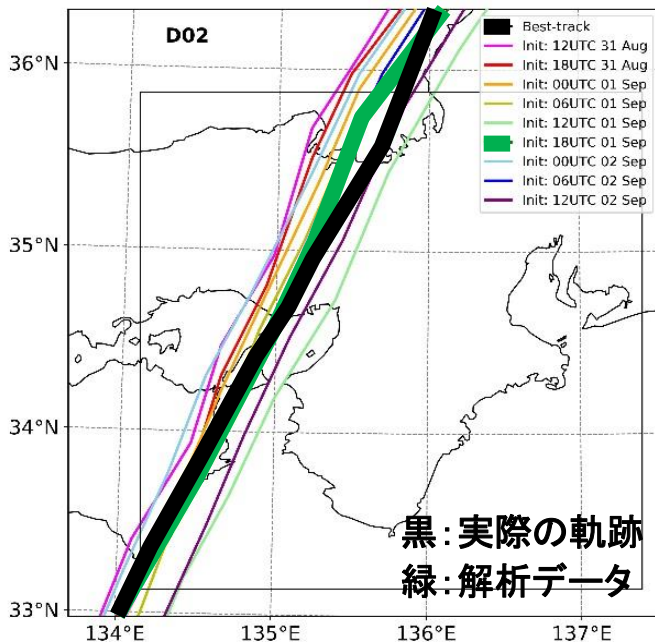


風向計の損傷は、飛来物によるものと推測する。

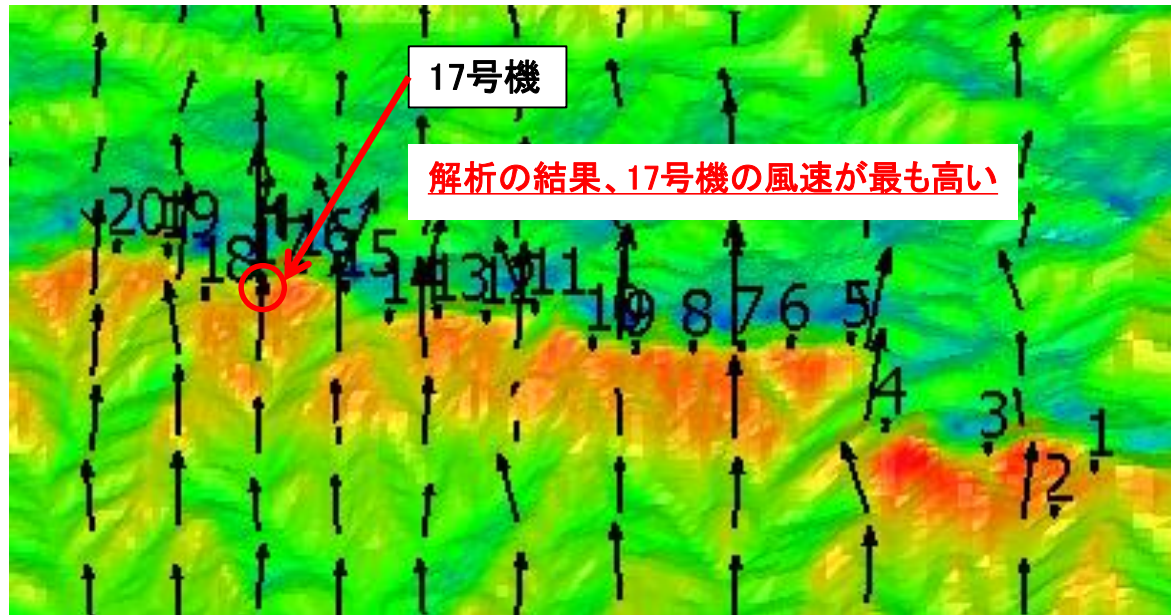
6. 台風21号の強風解析

台風通過時、17号機ナセル上部の風速計が損傷し、事故時の風速データが欠損している。また、風車は10秒平均と10分平均の風速を記録しているが、風車強度の基準となる3秒平均風速は計測されていない。

このため、領域気象モデルであるWeather Research and Forecasting (WRF)モデルを用いて台風を再現し、ラージエディシミュレーション(LES)を用いてサイトの気流解析を行い、極値3秒平均風速 V_{e50} を算出した。



WRFモデルによる台風解析

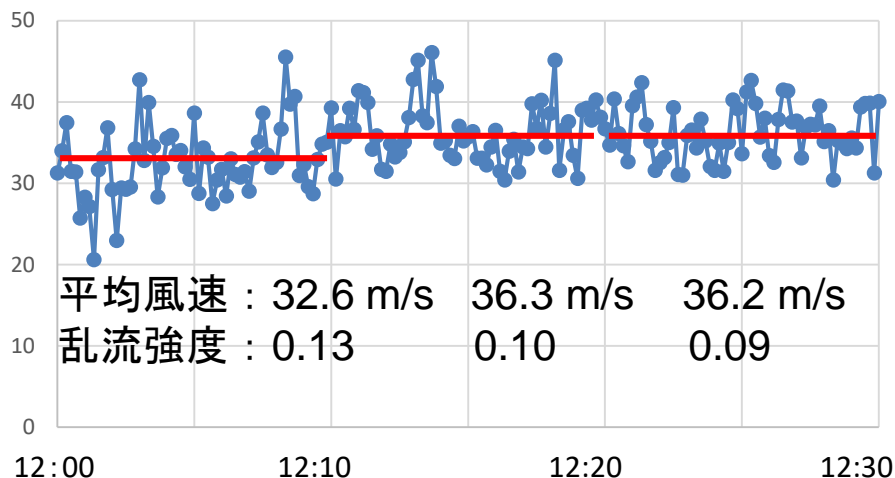


LESによるサイトの気流解析

6. 台風21号の強風解析

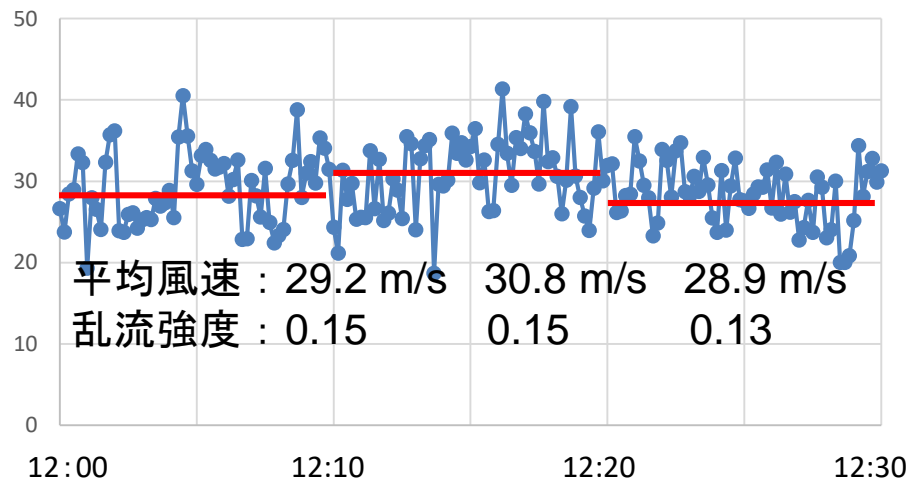
17号機で観測された風速データが欠損しているため、近隣の16・18号機の風速データとLESの解析値から求まる風速比から17号機のハブ高さの10分平均風速を求めた。

No.16 Wind Speed



16号機

No.18 Wind Speed



18号機

風車番号	風速比			乱流強度の比		
	16	17	18	16	17	18
LES解析結果	1.00	1.27	0.86	1.00	0.89	1.50
実測	1.00	なし	0.84	1.00	なし	1.34

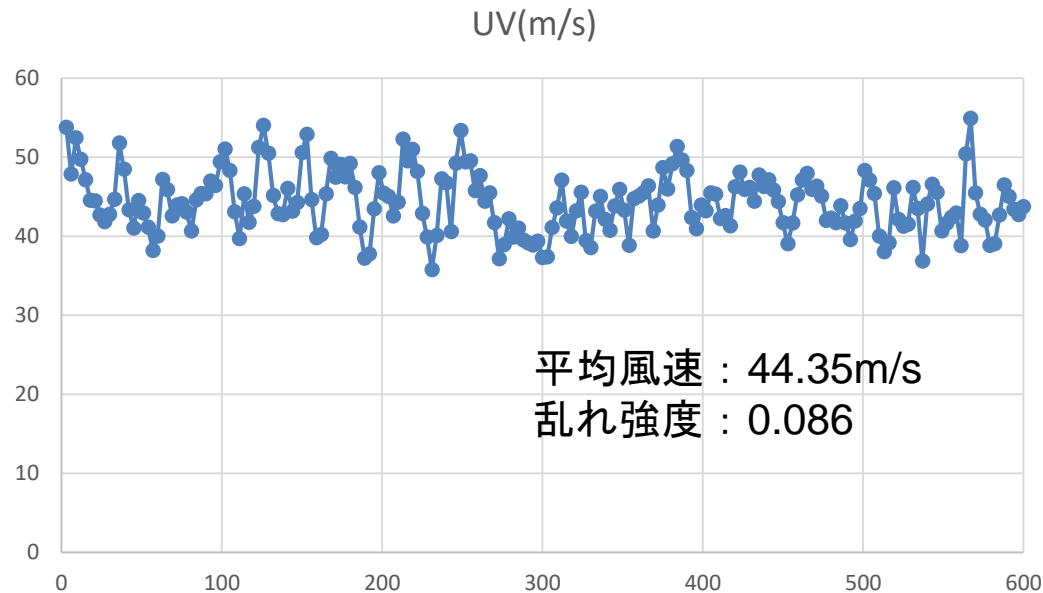
10分平均風速

$$U(x, y, H_h, \theta) = 44.35m/s$$

6. 台風21号の強風解析

Ve50の算出については、ウインドファーム認証に係る技術資料(日本海事協会) AnnexC 風条件の評価方法を参照した。

気流解析はLESにより、3秒間隔のデータを作成し、主風向変動風速の標準偏差を算出している。



LESによる17号機のハブ高さにおける風速変動

6. 台風21号の強風解析

前記の解析データをもとに、下記のパラメータを計算し、17号機の極値風速 V_{e50} を求めた。

$$G_f = 1 + 3.5I_{h1} = 1 + 3.5 \times 0.142 = 1.497$$

$$I_{h1} = E_{tI}I_p = 0.142 \times 1$$

$$E_{tI} = 1、 I_p = 0.142$$

$$U_h = E_{tV}E_{pV}V_0 = 1 \times 1.305 \times 34 = 44.4$$

$$E_{tV} = 1、 E_{pV} = 1.305$$

和歌山における $V_0 = 34\text{m/s}$

$$V_{e50} = G_f U_h = 1.497 \times 44.4 = 66.5\text{m/s}$$

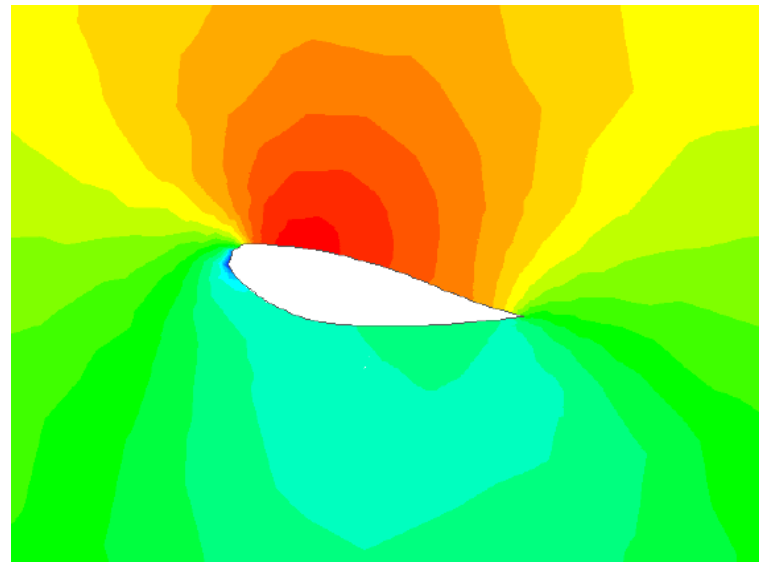
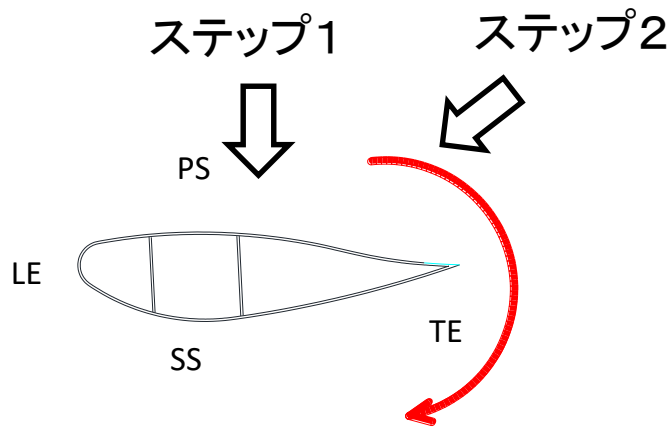
事故当時、17号機では3秒平均で70m/sに近い風が吹いていたものと推測する。

7. ブレードの構造解析

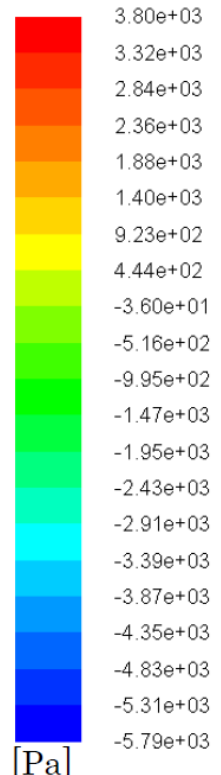
17号機の運転状況と破断面の結果より、「曲げ」と「ねじり」を同時に受ける状況を以下のステップで再現し、ブレードにかかるせん断応力を解析した。

ステップ1: 風向90° PS側から風圧荷重(「曲げ」主体)

ステップ2: 風向135° TE側から風圧荷重(「ねじり」主体)



CFDにより求めた風速70m/sのブレードまわりの圧力分布の一例

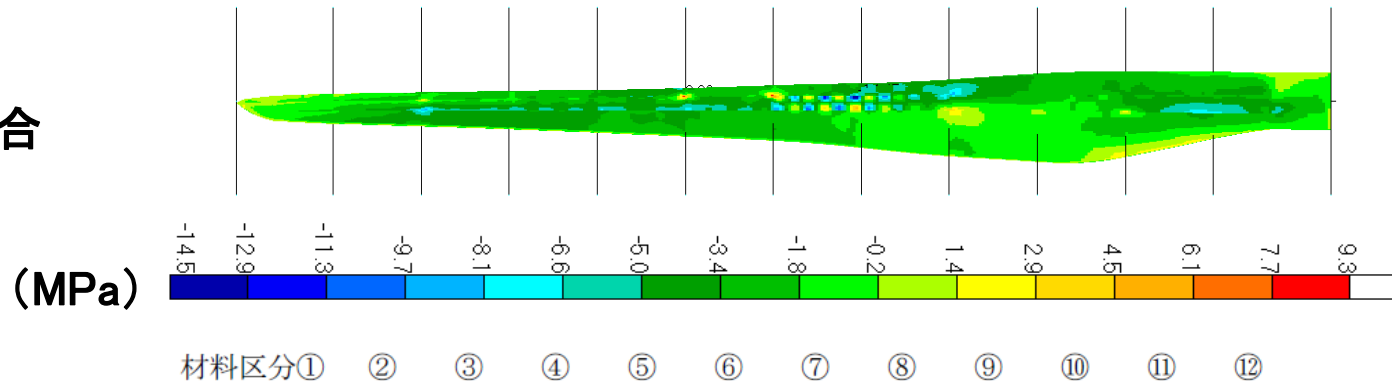


7. ブレードの構造解析

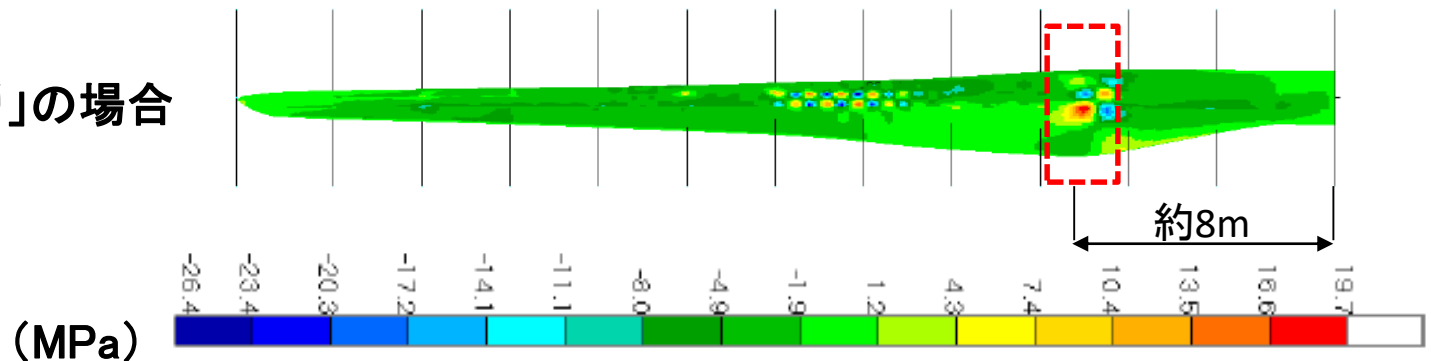
ステップ1で風速70m/s相当の荷重を載荷した状態で、ステップ2の荷重を風速70m/s相当まで上昇すると桁の損傷からブレード表面の□位置(ブレード根本から約8mの位置)に高いせん断応力を確認した。

構造解析結果では、ブレードに「曲げ」のみの負荷では損傷は発生しないが、「曲げ」と「ねじり」が同時に作用した場合は損傷が発生する。

「曲げ」のみの場合



「曲げ」と「ねじり」の場合



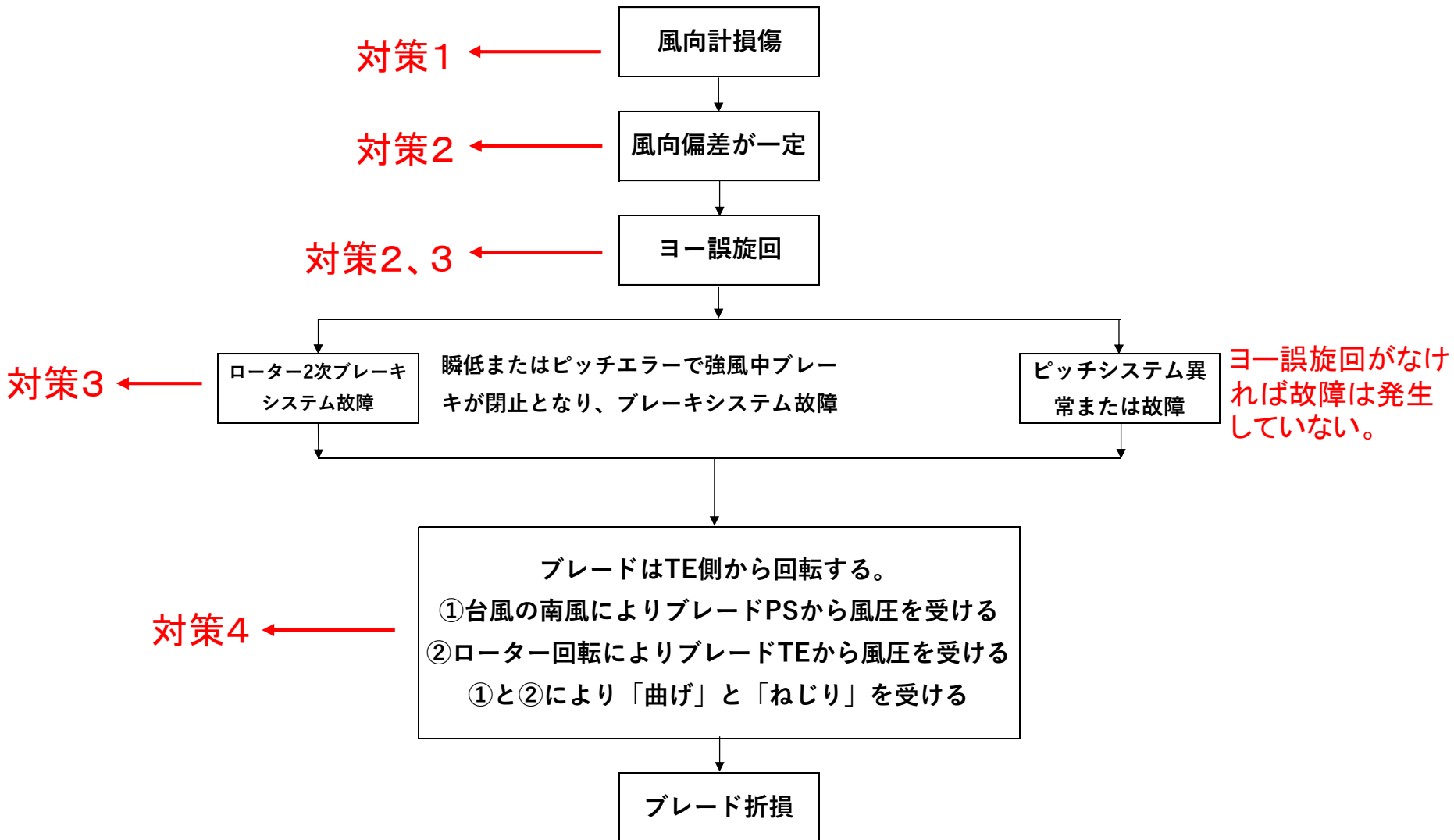
せん断応力分布(PS面)

8. ブレード折損の推定原因

- ① 台風21号により、風車の耐風速 ($V_{e50}=55\text{m/s}$)を上回る強風が吹いた。
- ② 飛来物により風向計が損傷し、風向偏差が一定となって、強風の中をヨーが誤旋回した。その後、ピッチも故障した。
- ③ ブレードは、逆ファインの状態固定され、ローターが回転し、抗力側(PS)から揚力側(SS)へ「曲げ」を受け、さらに、トレーリングエッジ(TE)側から「ねじり」を受けた。
- ④ 「曲げ」と「ねじり」を同時に受けたことで、ブレード内部桁が損傷、外部シェルに過大な応力が発生し、ブレード折損に至ったと推定する。

9. 再発防止対策(20機)

ブレード折損までの過程の中で以下の対策を実施し、再発を防止する。



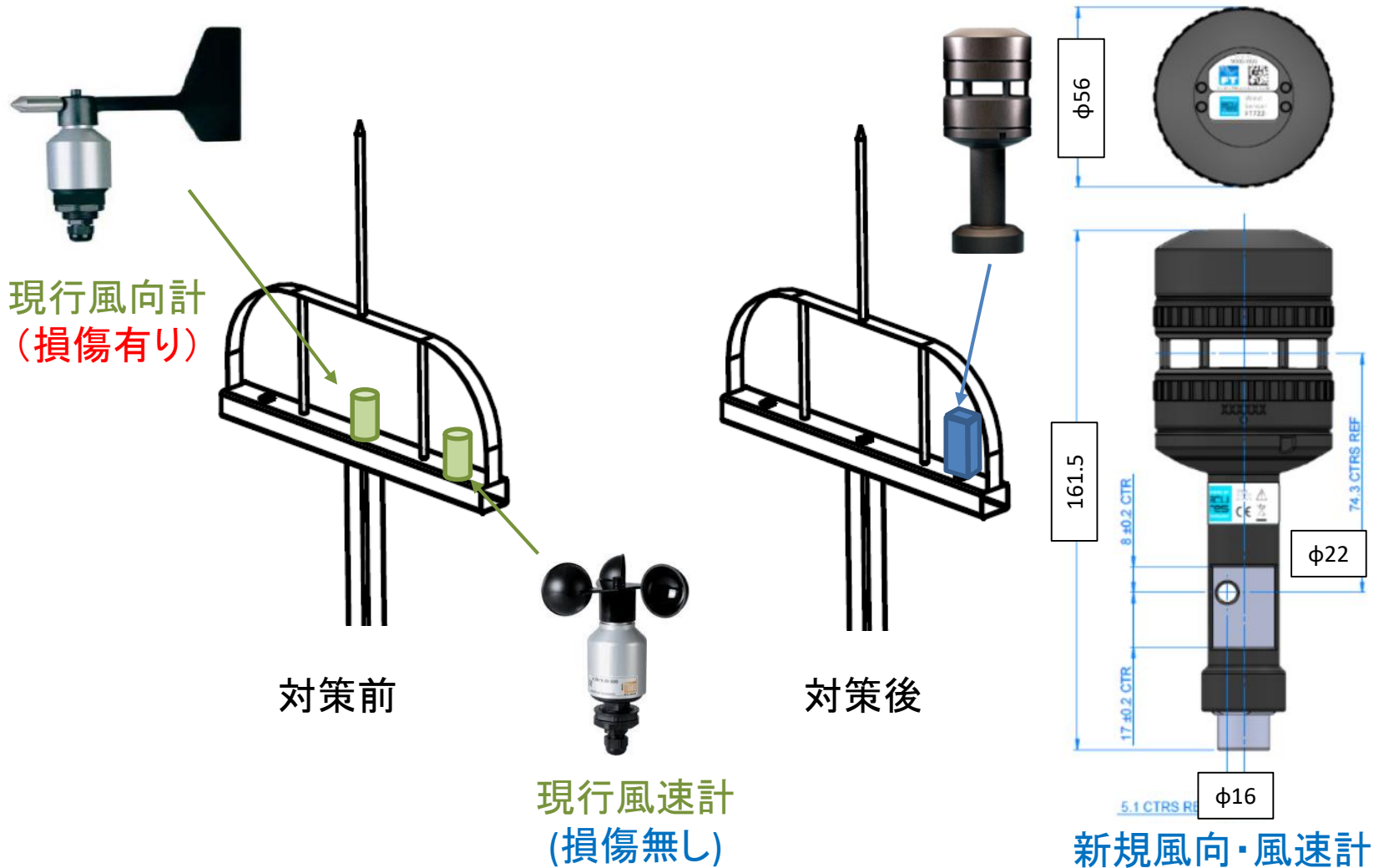
9. 再発防止対策 [対策1]

対策として、**可動部がなく耐風強度を上げた超音波式**の風向・風速計に変更する。

		現行風向計	新規風向計
種類		風向計	風向・風速計
メーカー名		Adolf Thies	FT Technology
型番		4.3128.00.000	FT702
計測方式		翼型	超音波式
風向	計測レンジ	0～360度	0～360度
	精度	+/-0.5度	+/-2度
使用条件	温度	-30℃～+70℃	-40℃～+85℃
	湿度	0～100%	0～100%
	耐風速	80m/s	85m/s
保護等級		IP55	IP67
重量		600g	320g
外観			

9. 再発防止対策 [対策1]

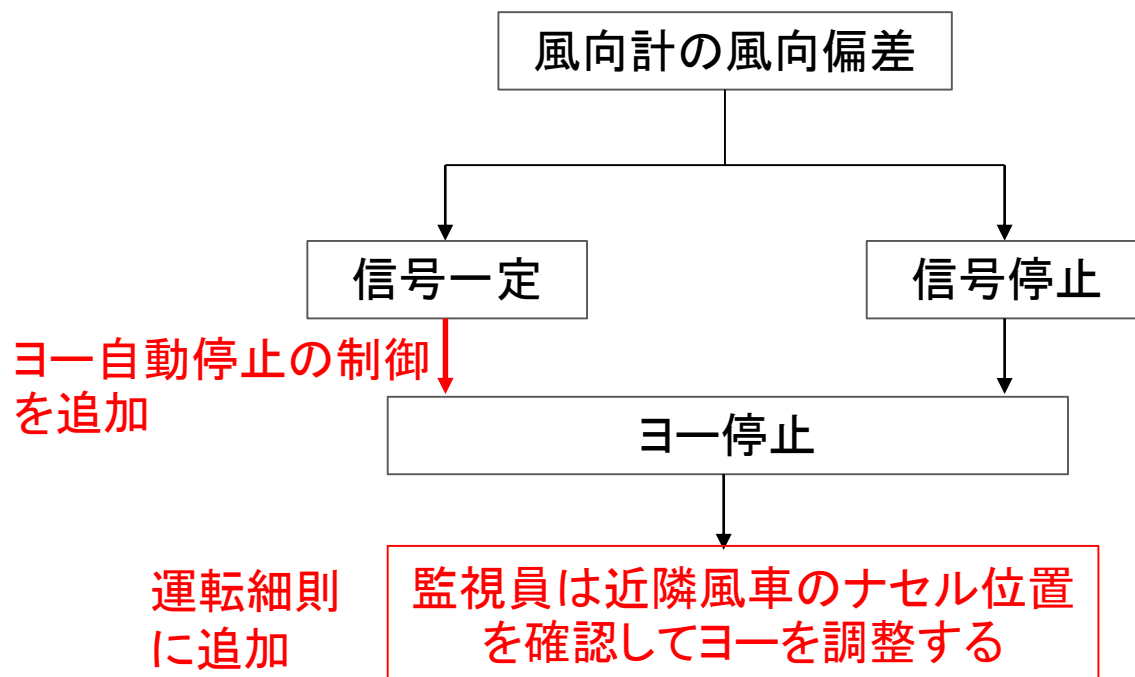
台風21号では、端部に設置していた風速計に損傷はなかった。そのため新規風向・風速計は、損傷が発生しなかった架台位置に設置し飛来物対策とする。



9. 再発防止対策 [対策2]

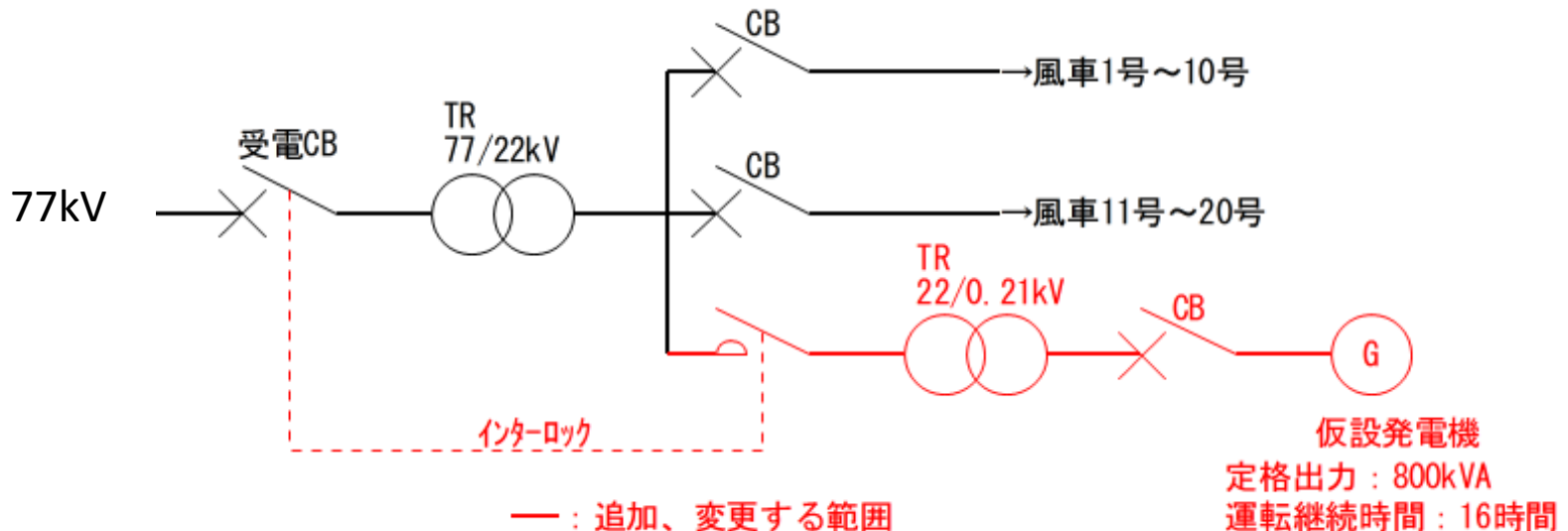
風向計の風向偏差が一定値で継続した場合は、風向計故障と判断し、ヨ一旋回を自動的に停止する制御を追加する。

ヨ一旋回が停止した後、監視員は遠隔監視装置を使い、手動操作によりヨ一を旋回し、ナセルを風向に正対させる。



9. 再発防止対策 [対策3]

- 電力会社の送電線が停電した場合でも、ヨ一制御を継続して正常に動作するための発電機を設置する。
- 瞬時電圧低下が発生するとローター二次ブレーキが故障する可能性があるため、台風(階級:非常に強い)が接近する場合には、事前に発電機を起動し、風車へ電源供給する。

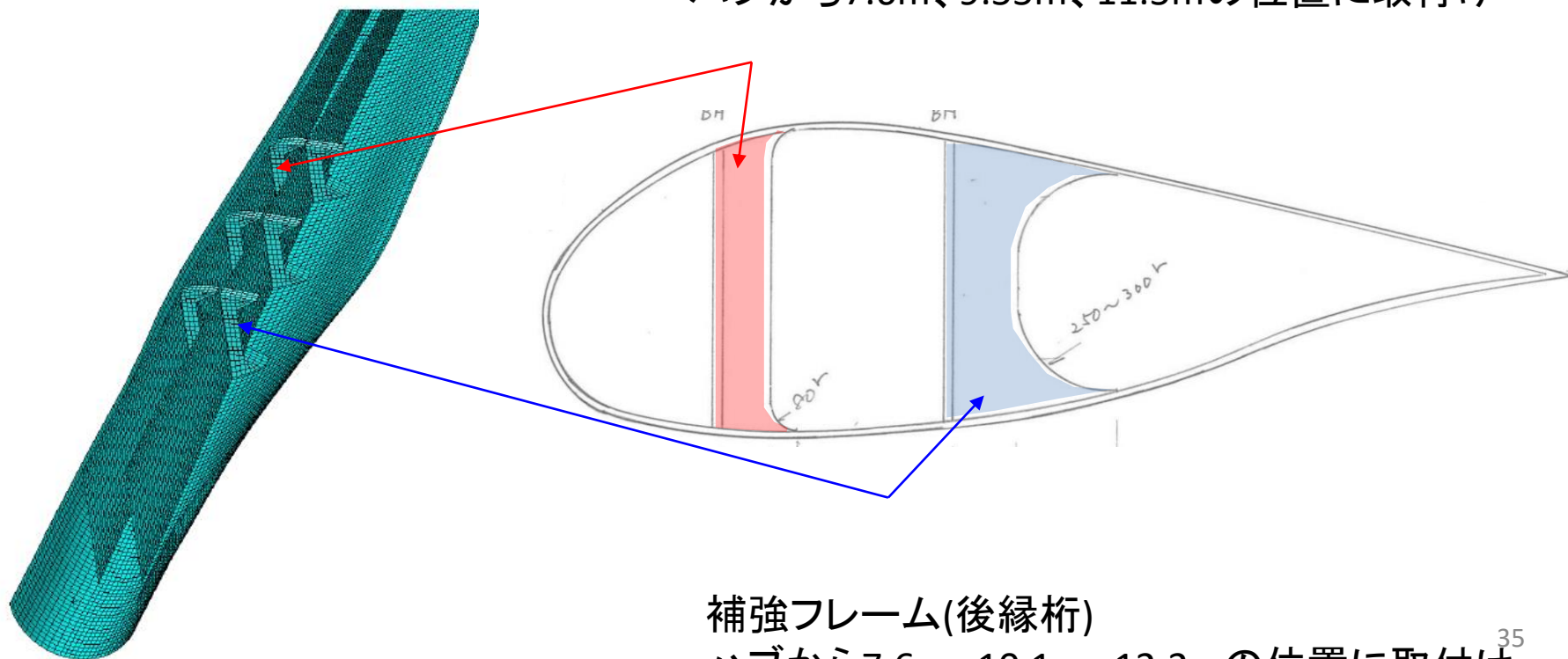


9. 再発防止対策 [対策4]

「曲げ」と「ねじり」を受ける場合に対処するため、ブレード内の2条の内部桁に各々3本の補強フレームを取付ける。

補強フレーム(前縁桁)

ハブから7.6m、9.55m、11.5mの位置に取付け



補強フレーム(後縁桁)

ハブから7.6m、10.1m、12.2mの位置に取付け

9. 再発防止対策 [対策4]

ブレード内部の補強の効果を下図に示す。補強した場合には、「曲げ」と「ねじり」を受けた場合でも、せん断応力が低減する。

