

苫前グリーンヒルウインドパーク

11 号風車破損事故

報 告 書

2013 年 11 月 15 日

株式会社ユーラスエナジージャパン

目 次

1. 設備概要と事故概要	1
1-1. 設備概要	
1-2. 事故概要	
2. 事故発生時の気象・運転状況	6
2-1. 事故発生時の気象状況	
2-2. 事故発生時の運転状況	
3. 事故の状況	8
3-1. ロータハブの落下状況	
3-2. 各部の損傷状況	
4. 主軸および軸受の概要・履歴	18
4-1. 主軸および軸受の概要	
4-2. 事故機の保守点検履歴	
4-3. 当社同型風車のトラブル履歴	
4-4. 事故機の主軸履歴	
5. 事故原因の究明	29
5-1. 事故原因の究明方針	
5-2. 苫前 11 号機の破断面確認	
5-3. 疲労応力・亀裂進展寿命等の定量的解析	
5-4. 超音波探傷検査	
5-5. 主軸の寸法測定、浸透探傷検査、磁粉探傷検査	
5-6. 事故原因究明まとめ	
6. 再発防止対策	59
6-1. 直接原因に対する防止対策	
6-2. 当社の取組	
7. 今後の対応について	60
苫前グリーンヒルウインドパーク 風車破損事故調査委員会 名簿	61
苫前グリーンヒルウインドパーク 風車破損事故調査委員会 開催実績	62

1. 設備概要と事故概要

1-1. 設備概要

苫前グリーンヒルwindパーク（以下、「苫前 GHWP」）は、北海道苫前郡苫前町字上平 15-1 に出力 1,000kW の風車 20 基を有し、1999 年 11 月 1 日に運転を開始した。

風車レイアウトを図 1-1、サイト内に設置されている風力発電設備の基本諸元を表 1-1、電気設備の基本諸元を表 1-2、風車外形図を図 1-2、ナセル断面図を図 1-3 に示す。

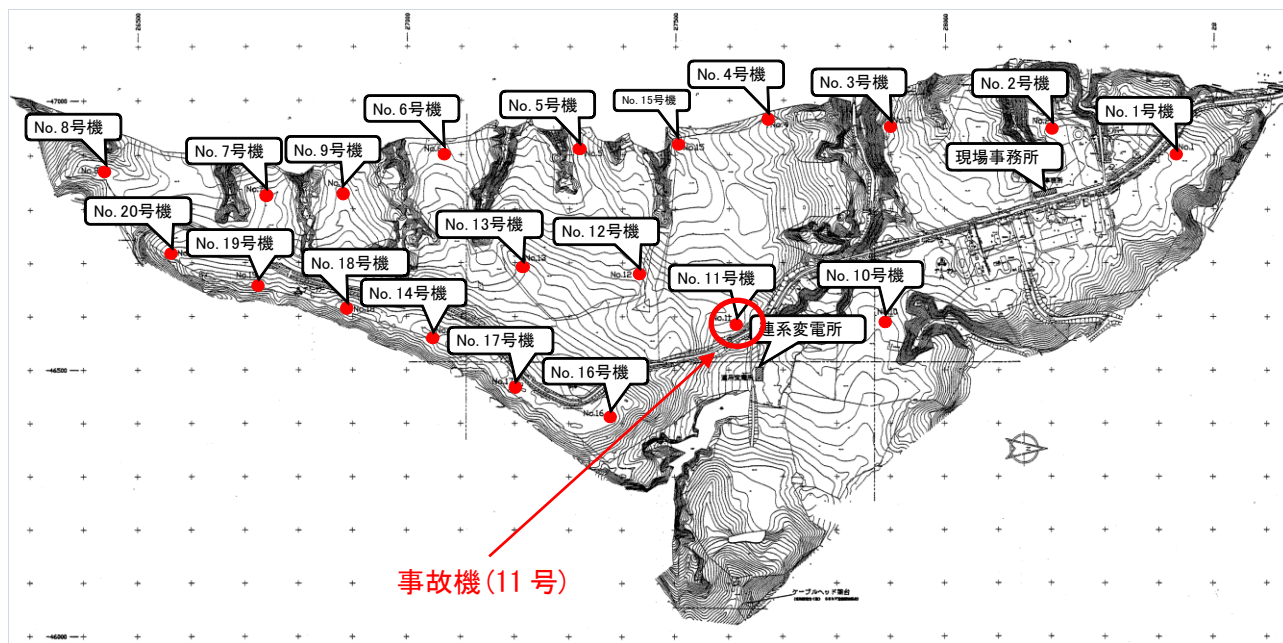


図 1-1 風車レイアウト図

表 1-1 風力発電設備の基本諸元

製造者	Bonus Energy A/S(現 Siemens Wind Power A/S)
種類	プロペラ型 アップウインド式
出力	1,000/200kW（極数切換方式）× 20 台
定格回転数	22/15rpm
ロータ直径	54.2m
ハブ高さ	45m
カットイン風速	3m/s
定格風速	15m/s
カットアウト風速	25m/s
ブレード材質	ガラス繊維強化プラスチック
ブレード長さ	26.1m
ブレード重量	約 4t（1 枚あたり）
認証クラス	DNV Class B
耐風速	42m/s ($V_{10min/hub}$)、55m/s ($V_{3sec/hub}$)

表 1-2 電気設備の基本諸元

発電機	容量	1,000kW／200kW × 20 台
	電圧	690V
変圧器 (発電機昇圧用)	容量	1,000kVA × 20 台
	電圧	690V／6.6kV
変圧器 (系統連系用)	容量	25,000kVA × 1 台
	電圧	6.6kV／66kV
遮断器 (発電機昇圧変圧器 2 次用)	電圧	7.2kV
	電流	600A
	遮断容量	20kA × 20 台
遮断器 (系統連系用)	電圧	72kV
	電流	800A
	遮断容量	20kA × 1 台
構内電線路	電圧	6.6kV

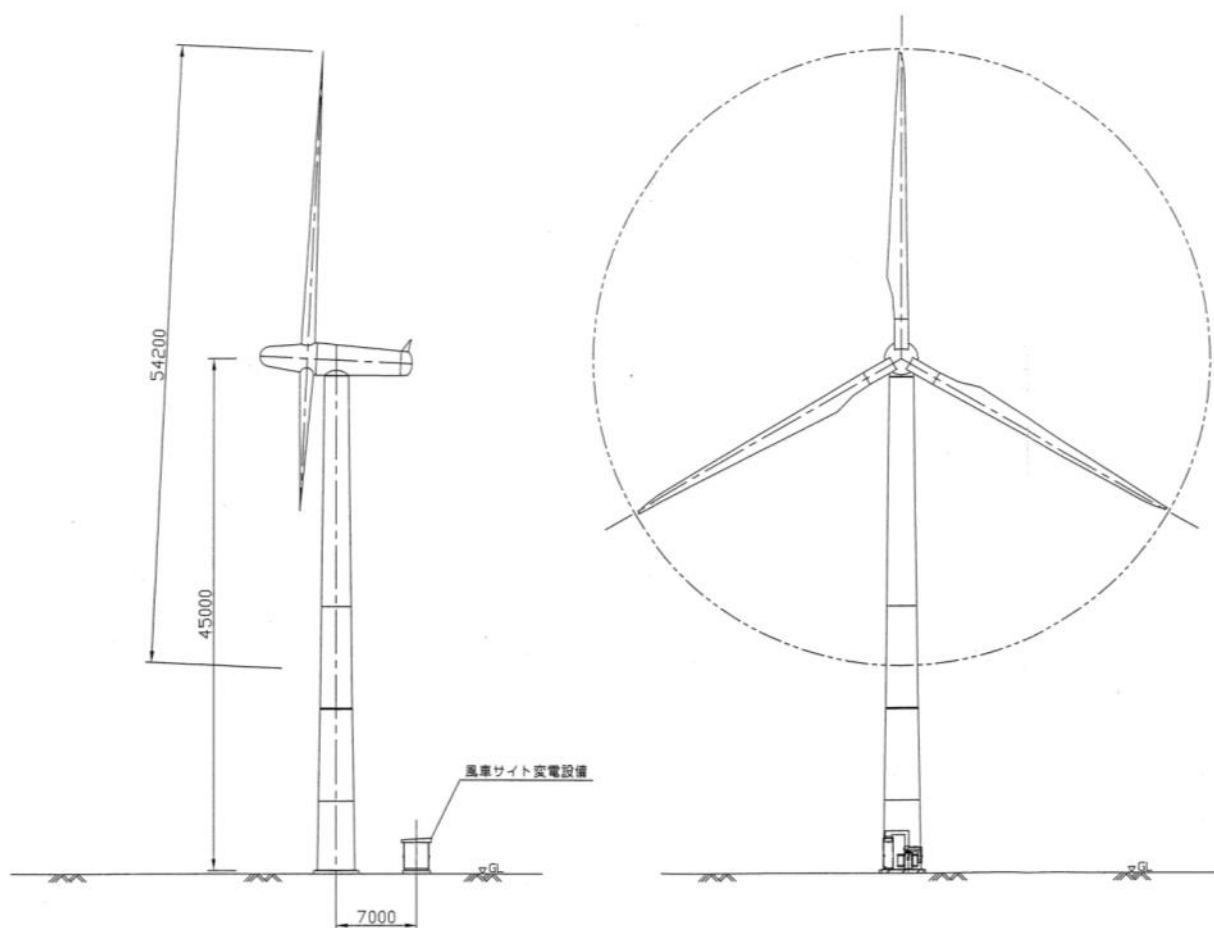
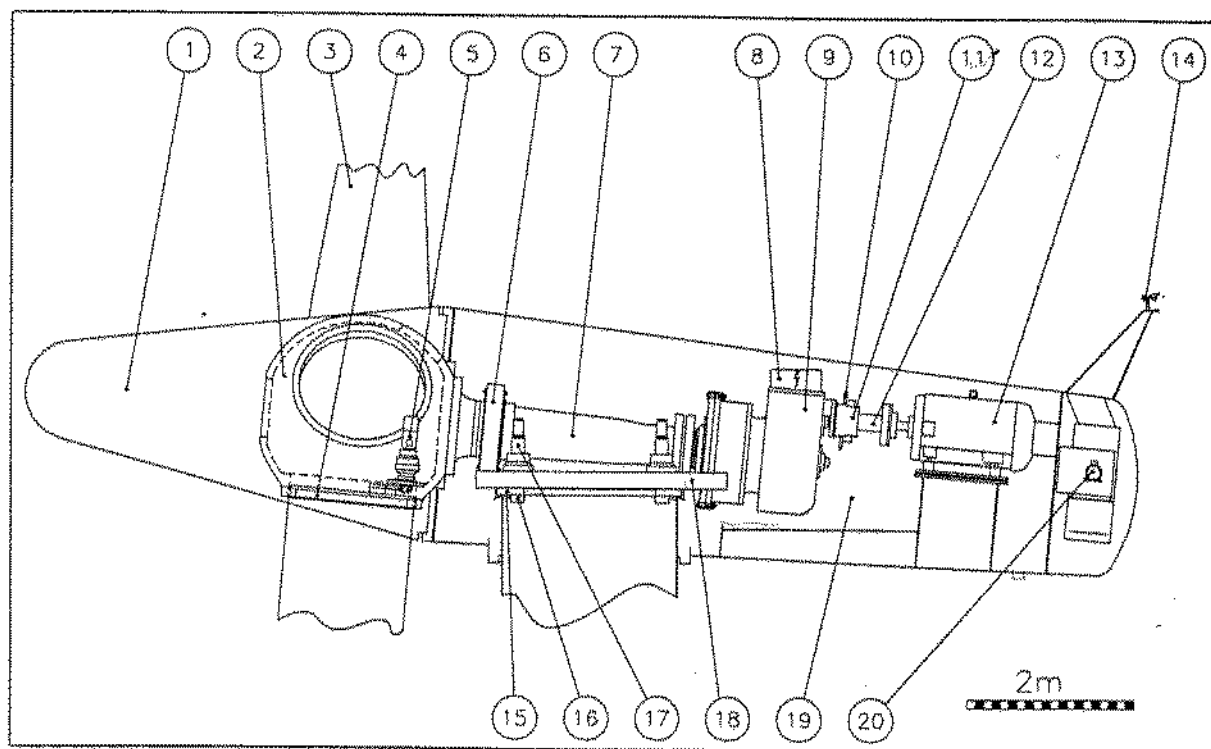


図 1-2 風車外形図



Dansk

1. Spinner
2. Rotornav
3. Vinge
4. Pitchleje
5. Pitchgear
6. Hovedleje
7. Hovedaksel
8. Topboks for styring
9. Hovedgear
10. Bremseskive
11. Bremskaliper
12. Kobling
13. Generator
14. Meteorologiske sensorer
15. Krøjering
16. Krøjeleje
17. Krøjegear
18. Maskinramme
19. Maskinskærm
20. Generatorblæser

English

1. Spinner
2. Rotor hub
3. Blade
4. Pitch bearing
5. Pitch gearbox
6. Main bearing
7. Main shaft
8. Top controller
9. Gearbox
10. Brake disc
11. Brake caliper
12. Coupling
13. Generator
14. Meteorological sensors
15. Yaw ring
16. Yaw bearing
17. Yaw gearbox
18. Nacelle bedplate
19. Canopy
20. Generator fan

Deutsch

1. Spinner
2. Nabe
3. Rotorblatt
4. Pitchlager
5. Pitchgetriebe
6. Hauptlager
7. Hauptwelle
8. Obere Steuerungskasten
9. Getriebe
10. Scheibenbremse
11. Bremsattel
12. Kupplung
13. Generator
14. Windfane und Anemometer
15. Verzahnte Kranz
16. Gleitführung
17. Windnachführung
18. Maschinenrahmen
19. Gondel
20. Kühlung

図 1-3 ナセル断面図

1-2. 事故概要

2013 年 9 月 5 日(木)4:44 にアラームがあり、11 号機が停止した。風車のロータハブ（ブレード 3 枚含む）が脱落・落下していることを確認し、7:10 に風車破損事故と判断した。脱落・落下したロータハブの外観を目視で観察したところ、主軸が破断していることを確認した。

なお、事故に伴う死傷、火災、供給支障、公共施設への被害は一切無い（図 1-4～1-6 参照）。

一方、保安に万全を期すために、同型風車（苫前 20 基、遠別 3 基、浜頓別 3 基）は全て停止措置を行うとともに、発電所入口にバリケードを設置した。

事故発生後の対応内容を表 1-3 に示す。



図 1-4 タワー状況



図 1-5 ロータハブ落下状況



図 1-6 ロータハブ落下状況(主軸破断状況)

表 1-3 事故発生後の対応内容

日時	対応内容
2013/9/5 4:44	アラームがあり、11号機が停止。
2013/9/5 6:50	近隣企業より、苫前事業所長に風車のローターハブが脱落・落下している旨の連絡が入る。
2013/9/5 7:10	苫前事業所長が現地にて、風車のローターハブが脱落・落下していることを確認。 風車破損事故と判断。
2013/9/5 7:20	本社工務部に連絡。 苫前GHWP同型風車停止措置実施。 遠別WP同型風車停止措置実施。
2013/9/5 7:30 ～	苫前町役場、企画振興課、農林水産課、建設課へ風車破損事故発生の連絡。 漏油対応措置を実施。
2013/9/5 8:30	発電所入口にバリケードを設置。
2013/9/5 8:30 ～	周辺部の飛散物（FRP破片および金属片）を回収。
2013/9/5 9:30	
2013/9/5 10:20	浜頓別WF同型風車停止措置実施。
2013/9/5 13:00	北海道産業保安監督部電力安全課へ電話にて一報を連絡。
2013/9/6 9:18	北海道産業保安監督部電力安全課へ、電気関係報告規則に基づく電気事故速報を提出。

2. 事故発生時の気象・運転状況

2-1. 事故発生時の気象状況

旭川地方気象台の留萌地方羽幌測候所の気象データによると、事故発生前日の9月4日(水)の昼間から5日(木)3:00まで小雨が降り続けていた。5日(木)4:00時点では南西の風6.5m/s(天候:曇り、気温:22.2℃)であり、5:00時点では南西の風8.7m/s(天候:曇り、気温:22.2℃)であった。

2-2. 事故発生時の運転状況

9月5日(木)のアラームログを表2-1に示す。4:44に「Overspeed VCU(過回転)」が、続けて「G-Sensor Activated(加速度異常)」、「Pitch (A、B、C) encoder error(ブレード角度検知センサー異常)」、「Hyd. Oil Level/Temp error(制御油レベル/温度異常)」が発報した。

表 2-1 アラームログ

TimeOn	TimeOff	Alarmcode	AlarmText
2013/9/4 4:36	2013/9/4 4:38	78	Pitch lubrication
2013/9/5 4:36	2013/9/5 4:39	78	Pitch lubrication
2013/9/5 4:44	2013/9/5 4:45	80	Overspeed VCU
2013/9/5 4:45	2013/9/5 5:37	3	G-Sensor Activated
2013/9/5 4:45	2013/9/5 5:03	115	Pitch A encoder error
2013/9/5 4:45	2013/9/5 5:03	116	Pitch B encoder error
2013/9/5 4:45	2013/9/5 5:03	117	Pitch C encoder error
2013/9/5 4:46	2013/9/5 5:03	70	Hyd. Oil Level/Temp error
2013/9/5 7:39	2013/9/5 7:55	45	Main 690V cut out
2013/9/5 7:55		1001	No-Communication

←事故発生
(2013/9/5 4:44)

なお「Overspeed VCU」が発報されているが、後述の通りロータハブ落下状況からロータ過回転に至っていない。ロータハブ落下に伴いセンサーのケーブルが断線したことにより発報した。その理由としては、以下の通りである。

ロータの過回転センサーは、図2-1に示す通り、NC(ノーマルクローズ)のリミットスイッチであり、ロータ回転数が26rpm以上になるとスイッチが開放する。スイッチが開放する事で、電磁リレーの励磁が解かれる。その結果、電磁リレーのb接点が復帰し、風車の制御盤がOverspeed VCUを認識する仕組みである。

今回の事故は、事故時のロータの回転数が21rpmであった事および気象条件等から、過回転センサーが動作した事は考え難く、主軸内部の当該センサーのケーブルが、主軸の破断と共に断線し、Overspeed VCUの発報に至ったものと考えられる。

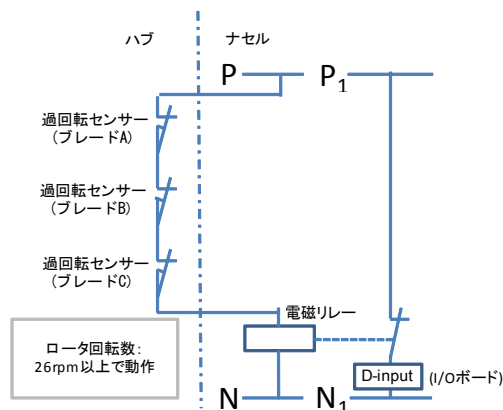


図 2-1 ロータ過回転検出のシーケンス

図 2-2～2-4 に苫前 11 号機の運転データ（風速、ロータ回転数・発電出力、ナセル角度、いずれも 10 分平均）を示す。

風速は、事故発生前日の 9 月 4 日（水）14:00 頃までは 3～5m/s 程度であり、その後上昇して 8～10m/s 程度となり、事故発生直前（9 月 5 日（木）4:40）の 10 分間平均風速は約 10.3m/s であった。

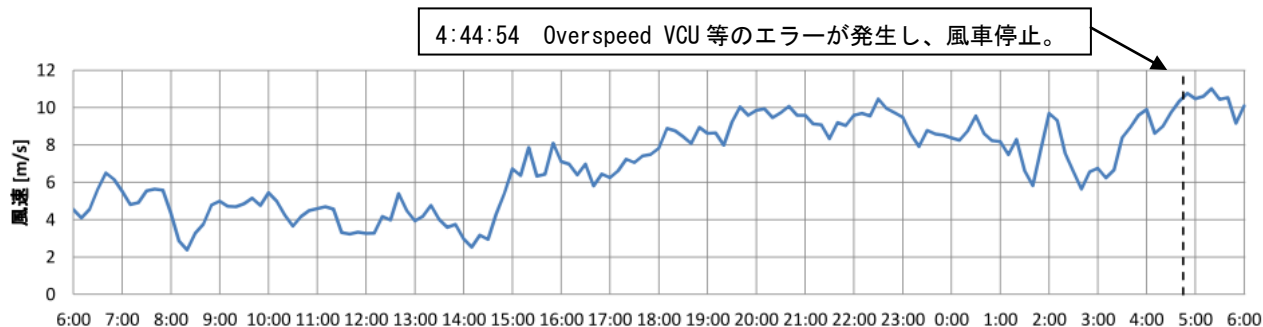


図 2-2 11 号機 風速

風車の運転状況は、9 月 4 日（水）15:00 頃までは小発電運転であり、それ以降は大発電運転であった。ロータ回転数は、小発電運転時に 14rpm、大発電運転時に 21rpm であり、風車の定格回転数とほぼ一致している。

発電出力は、風速（図 2-2 参照）の変化に伴い推移し、事故発生直前まで風車の運転状況に異常はなかった。事故発生直前の 9 月 5 日（木）4:40 の 10 分間平均発電出力は約 600kW であった。

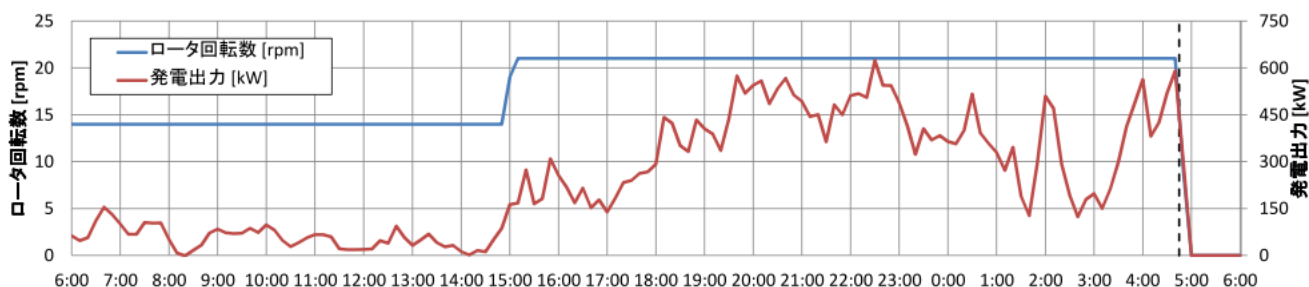


図 2-3 11 号機 ロータ回転数・発電出力

ナセル角度は、9 月 4 日（水）6:00～14:00 は概ね北東、4 日（水）15:00～5 日（木）1:00 は東南東、それ以降は西方向に旋回し、事故発生の 4:44 は南西方向であった。これは、旭川地方気象台の留萌地方羽幌測候所の気象データとほぼ一致しており、事故発生直前まで異常はなかった。

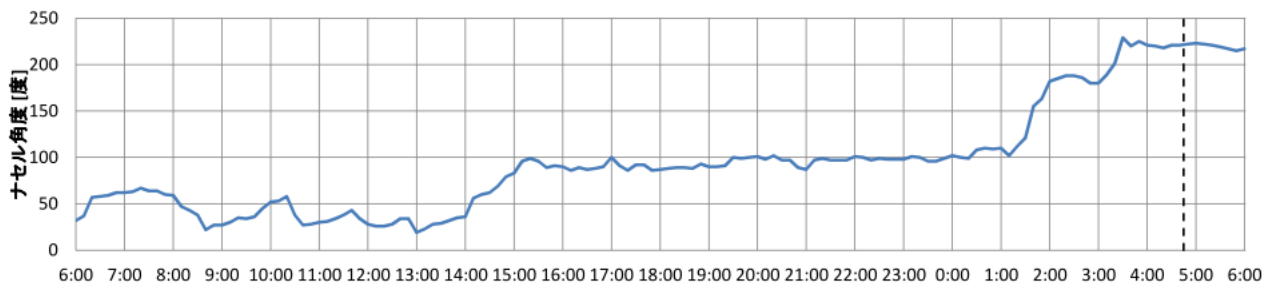


図 2-4 11 号機 ナセル角度

3-1. ロータハブ落下状況

FRP主桁破片A

FRP主桁破片B

FRP破片多数

2500mm

100mm

23500mm

サイトランス
キュービクル

Aブレード

リングB

ナセル

風車基礎

リングC

リングA

5000mm

148000mm

14200mm

2200mm

91000mm

11100mm

200mm

232000mm

2900mm

FPR主桁破片C

Bブレード

Cブレード

FRP破片多数

タワー側面(南側)

タワー側面(東側)

□ FRP主桁破片 約1~1.5m

○ FRP破材 約20~30cm

× FRP破材 約5cm

8

図 3-2～3-4 に飛散したリング A、B、C を示す。これらはタワーを中心にロータ半径（約 27m）以内の近隣に落下していた。（リングの説明は、4-4 章にて詳細に記述する。）



図 3-2 リング A



図 3-3 リング B



図 3-4 リング C

図 3-5～3-7 に FRP 主桁破片 A、B、C、D を示す。これらはブレードの近隣に落下していた。

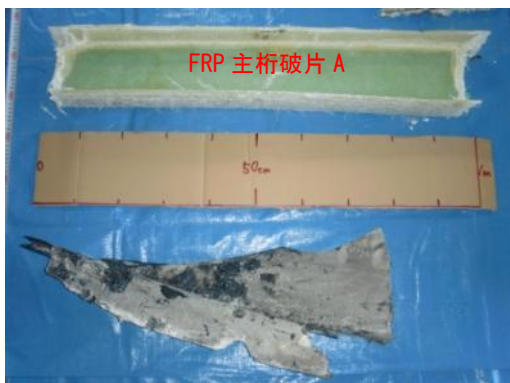


図 3-5 FRP 主桁破片 A

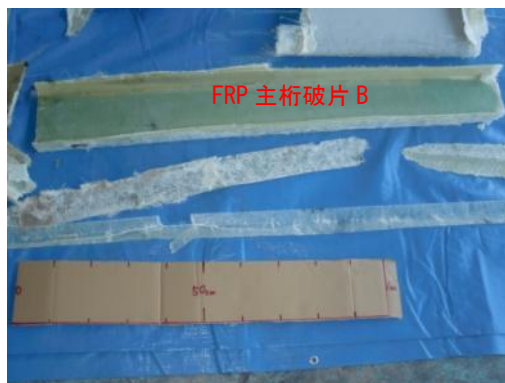


図 3-6 FRP 主桁破片 B

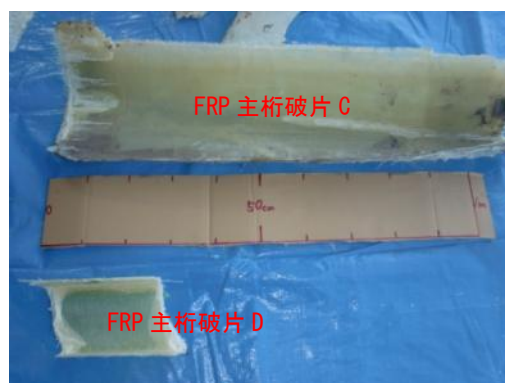


図 3-7 FRP 主桁破片 C、D

図 3-8、3-9 に FRP 破片を示す。これらもブレード近隣に落下しており、特に A ブレード北側及び C ブレード近隣に多く落下していた。



図 3-8 FRP 破片



図 3-9 FRP 破片

3-2. 各部の損傷状況

(1) タワー

タワー側面（南側）にブレードが接触して出来たと思われる凹みがあるが、それ以外には傷は認められなかった。

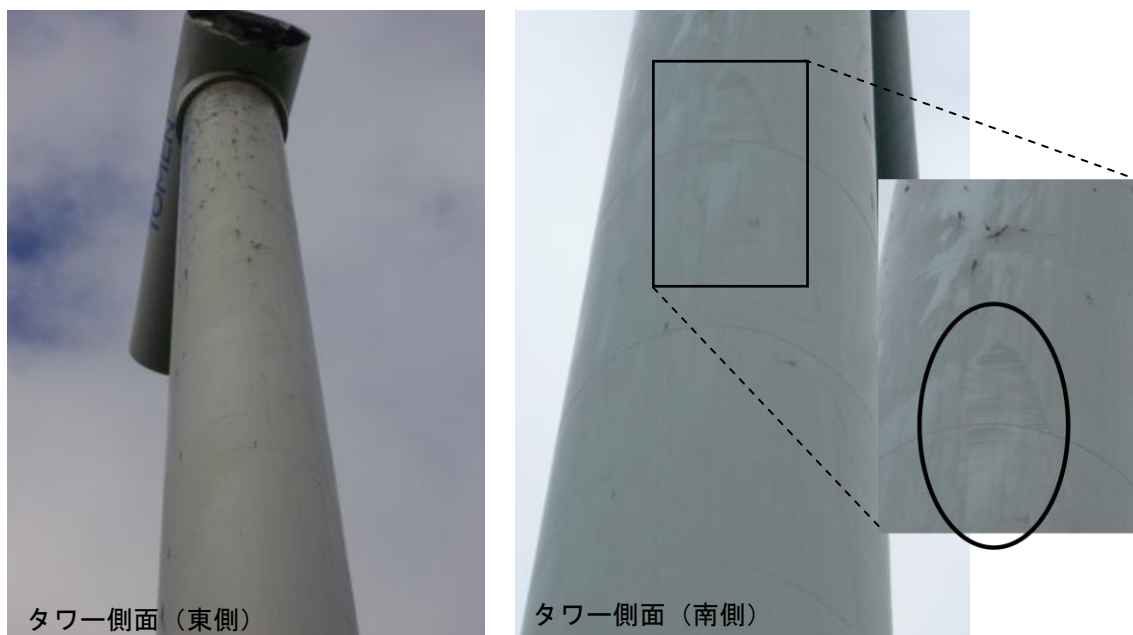


図 3-10 タワー状況

(2) ナセル

ロータハブ落下に伴い、以下の様相が確認された。

- ・ロータヘッド側はタワーとナセルの隙間はないが、発電機側には隙間があった。
- ・ナセルのハッチより前側の左右両側面に、周方向の凹みがあった。
- ・ナセル前部カバーの下側は、正面から見て時計回りに約 180 度回転していた。



図 3-11 ナセル(ロータヘッド側隙間)



図 3-12 ナセル(発電機側隙間)



図 3-13 ナセル(右舷)



図 3-14 ナセル(左舷)



図 3-15 ナセル (前面)

(3) ブレード

以下の様相が確認された。

- ・ A ブレード

ブレードの根元から裂けており、リーディングエッジ、トレーリングエッジが開いていた。

ブレードの先端 2.5m が折れ曲がっていた。

- ・ B ブレード

ブレードの先端 2.9m が折れ曲がっていた。タワーと接触したと思われる痕があった。

- ・ C ブレード

ブレードの根元から裂けていた。プレッシャーサイド（腹側）、サクションサイド（背側）が完全に分離していた。

それぞれ先端から 14.2m、14.8m で折れていた。



図 3-16 A ブレード



図 3-17 A ブレード

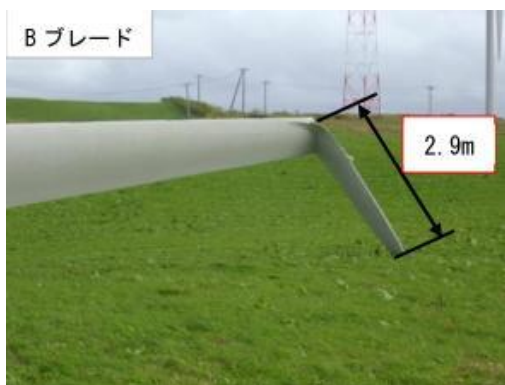


図 3-18 B ブレード



図 3-19 B ブレード



図 3-20 C ブレード

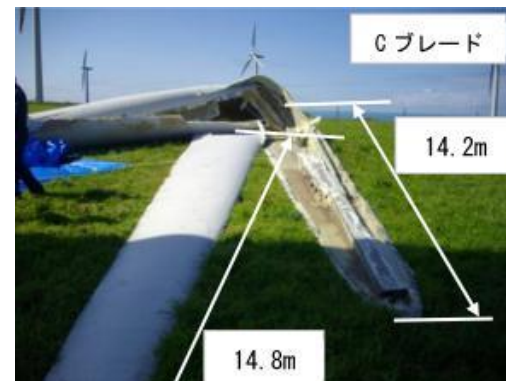


図 3-21 C ブレード

(4) 基礎

目視及び打音検査にて確認した結果、ペDESTAL、グラウト、アンカーボルトのいずれも異常は確認されなかった。



図 3-22 基礎



図 3-23 基礎

(5) 主軸破断状況

① ハブ側主軸破断面（落下側）

主軸の破断面を確認したところ、典型的な疲労破壊の様相が認められた。また、亀裂発生起点と思われる箇所は、主軸段付き部（軸受とグリスリング装着部の間）の曲率半径 R 部に複数（少なくとも 3 ヶ所）あった。



図 3-24 ハブ側主軸破断面

亀裂起点の詳細は、図 3-25 の通りである。疲労破壊により生じるビーチマークを、破断面に確認した。



亀裂起点 A



亀裂起点 B



亀裂起点 C

図 3-25 亀裂起点 (詳細)

②ナセル側主軸破断面

ナセル前部カバー(下側)が約 180 度反転しており、その撤去は安全確保上困難と判断し、確認可能な範囲で調査したところ、以下の様相が確認された。

- ・主軸直径は約 510mm であった。(設計は 530mm)
- ・主軸の周りに厚み約 20mm の主軸修正用リングがあった。(設計はリングなし)
- ・主軸段付き部の曲率半径 R は約 1mm 程度であった。(設計は 10mm)
- ・主軸段付き部の曲率半径 R 付近には溝は無かった。(設計は溝有り)

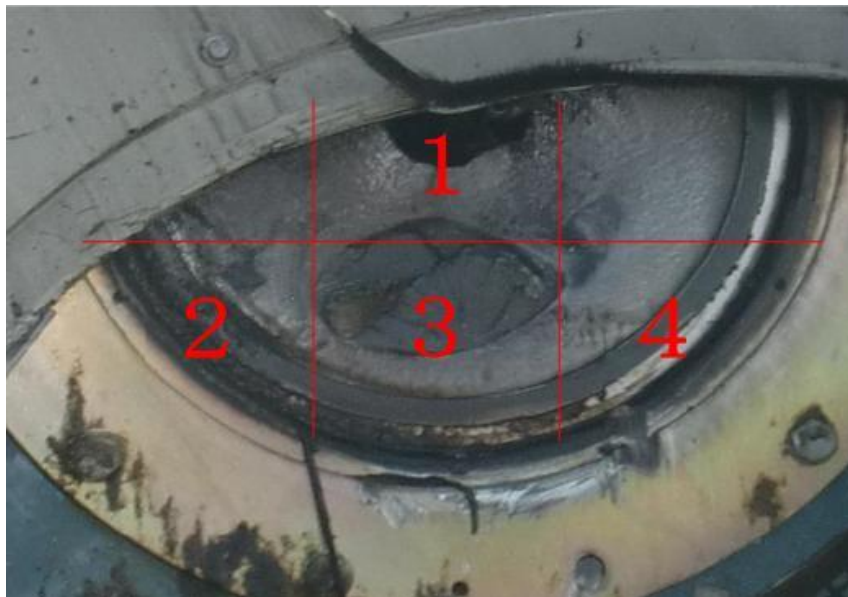


写真 1



写真 2



写真 3



写真 4

リング

図 3-26 ナセル側主軸破断面

4. 主軸および軸受の概要・履歴

4-1. 主軸および軸受の概要

主軸の断面図、主軸段付き部、成分表を図 4-1～4-3 に示す。主軸段付き部には、応力集中を和らげるために曲率半径 $R(R=10\text{mm})$ の加工がなされている。

主軸の材質は Fe510 規格品 (UNI 規格) であり、炭素量が 0.2～0.23% の低炭素鋼である。

なお、熱処理はなされていない。

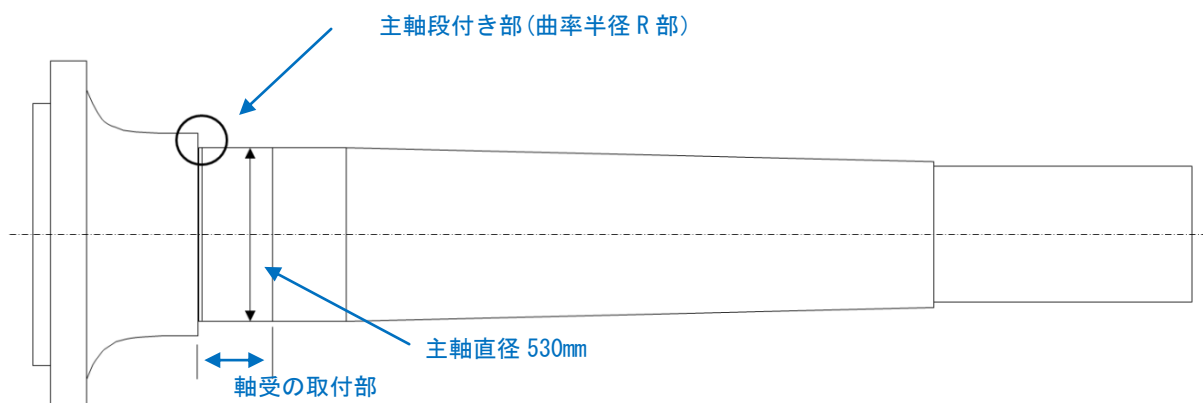


図 4-1 主軸断面図

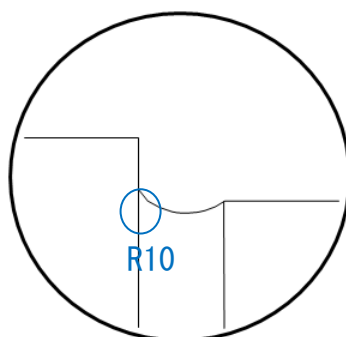


図 4-2 主軸段付き部

C%	Si%	Mn%	P%	S%	N%	Cu%	
max	max	max	max	max		max	
0.20 ^{a)}	0.55	1.60	0.025	0.025		0.40	Cast analysis
0.23 ^{a)}	0.60	1.70	0.035	0.035		0.45	Product analysis
FF deoxidation method - fully killed steel							S355J2 n° 1.0579
^{a)} max 0.22 by ladle analysis, max 0.24 of the product for thickness > 30 mm up to 100 mm							P% - S% max 0.03
^{a)} for nominal thickness > 100 mm, C content to be agreed							cast analysis

図 4-3 Fe510 規格品の成分表（当社調査）

軸受の写真と図を図 4-4、4-5 に示す。軸受は「自動調心ころ軸受 (230/530)」が使われている。自動調心ころ軸受の一般的な特徴は、

- ・ 外輪軌道の曲率中心が軸受の回転中心軸と一致した点を中心とする球面になっており、調心性があるため、取付誤差の影響を受けにくい。
- ・ アキシアル荷重の耐荷重が大きく、アキシアル荷重の加わった状態で、ある程度のラジアル荷重も負担できる。

という点が挙げられる。



図 4-4 軸受の写真（同型機の写真）

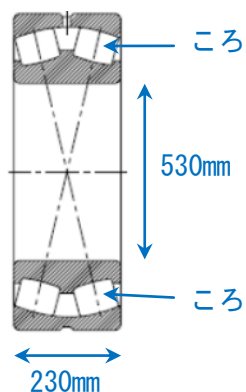


図 4-5 軸受の構造図 (230/530)

上記の主軸と軸受を組み合わせると図 4-6 のようになる。主軸および軸受のパーツ名称は図 4-7 に示す。



図 4-6 主軸および軸受の写真（同型機の写真）

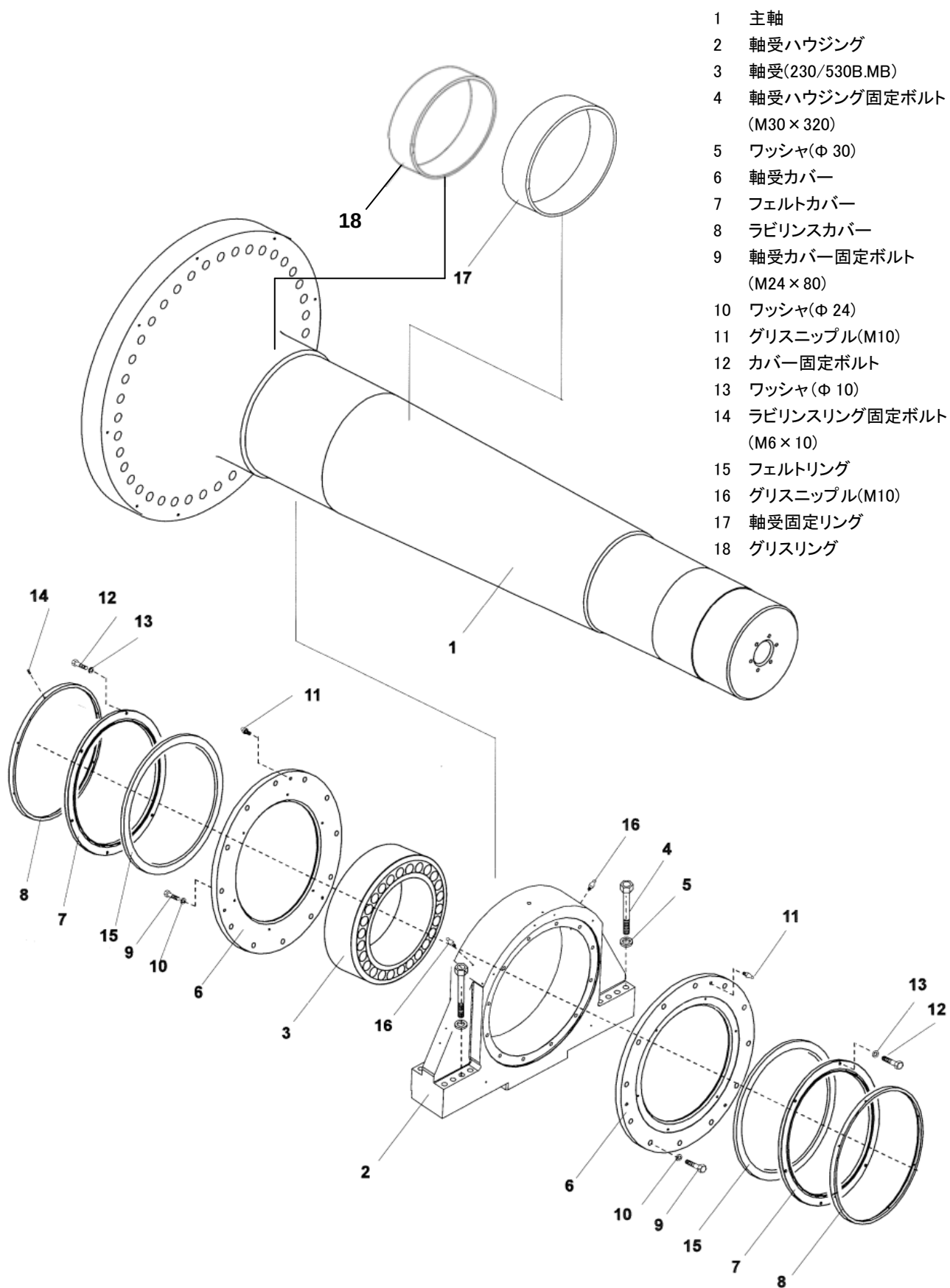


図 4-7 主軸および軸受

4-2. 事故機の保守点検履歴

苫前 11 号機の主軸および軸受の保守点検履歴を整理すると表 4-1 の通りである。2012 年 3 月に軸受の外輪の欠けを確認し、その後、2012 年 5～6 月に主軸および軸受の交換を実施した。主軸および軸受を交換した後は運転継続し、軸受に異常兆候は認められなかったが、9 月 5 日(木)に主軸の破断事故が発生した。

表 4-1 苫前 11 号機の主軸および軸受の保守点検履歴

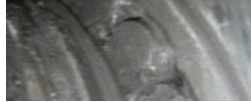
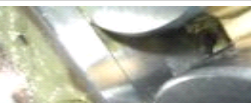
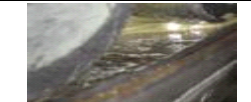
No.	日付	内容
1	2011 年 5 月 11 日	・ 定期点検（半年）、軸受の鉄粉濃度＝0.044%wt（管理値以内）
2	2011 年 12 月 6 日	・ 定期点検（1 年）、軸受の鉄粉濃度＝0.386%wt（管理値超） ・ 経過観察扱いとし、運転状況を注視することにした。
3	2012 年 3 月 13 日	・ 巡視時に軸受の異音を確認。 ・ 鉄粉濃度測定にて測定可能な範囲を逸脱したため、開放点検実施。 ・ 軸受の外輪の欠けを確認。 ・ 軸受の異常（増速機側への主軸後退）を検知するリミットスイッチを設置し、暫定運転扱いとした。
4	2012 年 4 月 26 日	・ リミットスイッチが作動。遠隔リセットを行い暫定運転再開。 ・ 軸受の自動調心性により、主軸後退は復帰。
5	2012 年 5 月 12 日	・ リミットスイッチが作動。現場確認のうえ暫定運転再開。 ・ 軸受の自動調心性により、主軸後退は復帰。
6	2012 年 5 月 31 日	・ 主軸および軸受の交換作業開始
7	2012 年 6 月 8 日	・ 定期点検（半年）
8	2012 年 6 月 11 日	・ 主軸および軸受交換後の増速機側シュリンク締結状態確認。 ・ 負荷遮断試験(2/4 出力)を実施。
9	2012 年 6 月 20 日	・ 主軸および軸受交換後の増速機側シュリンク締結状態確認。 ・ 負荷遮断試験(4/4 出力)を実施。
10	2012 年 6 月 21 日	・ 異常ないことを確認し、通常運転へ移行。
11	2012 年 8 月 3 日	・ 500 時間点検 （主軸および軸受交換から 500 時間経過に伴い、点検を実施）
12	2012 年 11 月 9 日	・ 定期点検(1 年)、軸受の鉄粉濃度＝0.022%wt（管理値以内）
13	2013 年 7 月 26 日	・ 定期点検（半年）、軸受の鉄粉濃度＝0.045%wt（管理値以内）
14	2013 年 8 月 20 日	・ 巡視（事故発生直近の巡視。特に異常なし。）
15	2013 年 9 月 5 日	・ 事故発生(4:44)

当社の軸受の鉄粉濃度管理値：0.07%wt 以下

4-3. 当社同型風車の主軸および軸受のトラブル履歴

当社グループは、苫前 11 号機と同型の風車を、当該事故機を除き 25 基（苫前 19 基、遠別 3 基、浜頓別 3 基）保有しており、主軸および軸受のトラブル履歴を整理すると表 4-2 の通りである。

表 4-2 主軸および軸受のトラブル履歴

No	年月日	サイト	事象		鉄粉濃度	処置
1	2006年7月	遠別3号	①外輪の欠け ②凹損傷あり		-	軸受交換 (J社)
2	2007年6月	苫前20号	①内外輪の剥離 ②凹損傷あり		0.850wt%*2	売却 (風車メーカー)
3	2009年1月	苫前6号	①外輪の欠け ②凹損傷あり		9.999wt%*1	軸受交換 (A社)
4	2009年2月	苫前3号	①外輪の欠け ②凹損傷あり		0.192wt%*2	軸受交換 (A社)
5	2009年3月	苫前19号	①外輪の剥離 ②凹損傷あり		8.800wt%*1	軸受交換 (A社)
6	2009年4月	苫前18号	①外輪の欠け ②凹損傷あり		9.999wt%*1	軸受交換 (A社)
7	2009年5月	苫前8号	①外輪の剥離 ②凹損傷あり		9.999wt%*1	軸受交換 (A社)
8	2010年6月	苫前16号	①外輪の剥離 ②凹損傷あり		1.180wt%*2	軸受交換 (A社)
9	2011年12月	苫前7号	①軸受焼付き ②凹損傷あり	図4-8	0.100wt%*2	軸受交換 及び 主軸補修 (A社)
10	2012年3月	苫前11号	①外輪の欠け ②凹損傷あり		9.999wt%*1	軸受交換 (A社)
11	2012年11月	遠別2号	①外輪の欠け ②凹損傷あり		9.562wt%*1	軸受交換 (A社)
12	2013年8月	浜頓別2号	異音・振動		9.999wt%*1	軸受交換 (A社)

*1：臨時点検(主軸および軸受の交換を判定するため)にて測定した値を示す。

*2：トラブル直前の定期点検にて測定した値を示す。

これまでに軸受破損が12件発生しており、2008年以降はA社に主軸および軸受の修理（軸受は新品に交換）を依頼し、修理完了後は予備品として保管して、次の軸受破損が発生した場合はその予備品に交換して復旧している。

本苫前11号機は2012年3月に軸受の異常が確認され、2012年5～6月に主軸および軸受の交換を実施したが、交換した主軸および軸受の履歴を調査したところ、以前に苫前7号機にて軸受焼付きの経緯があることが分かった。

主軸および軸受のうち、主軸の履歴を示すと表4-3の通りである。

表4-3 主軸の履歴

(T: 苫前GHWP H: 浜頓別WF E: 遠別WP)

主軸の番号	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
AA	T1							
AB	T2							
AC	T3		軸受破損 予備			T19		
AD	T4							
AE	T5							
AF	T6		軸受破損 予備	T3		注 予備	T7	
AG	T7					軸受焼付き 予備	T11	事故
AH	T8		軸受破損 予備		T16			
AI	T9							
AJ	T10							
AK	T11						軸受破損 予備	E2
AL	T12							
AM	T13							
AN	T14							
AO	T15							
AP	T16			軸受破損 予備		T3		
AQ	T17							
AR	T18		軸受破損 予備	T8				
AS	T19		軸受破損 予備	T18				
AT	T20	軸受破損	風車メーカーへ売却破棄					
AU	H1							
AV	H2							軸受破損 修理中
AW	H3							
AX	E1							
AY	E2						軸受破損 予備	H2
AZ	E3	軸受破損 予備	T20					
BA	E3							
BB				T6				

注: 苫前3号機の増速機交換の際に、主軸と増速機の切り離しが困難であったことから、一体で工事を実施

サイト号機	初期	現状	サイト号機	初期	現状	サイト号機	初期	現状	サイト号機	初期	現状
苫前No.1	AA	→ AA	苫前No.8	AH	→ AR	苫前No.15	AO	→ AO	浜頓別No.1	AU	→ AU
苫前No.2	AB	→ AB	苫前No.9	AI	→ AI	苫前No.16	AP	→ AH	浜頓別No.2	AV	→ AY
苫前No.3	AC	→ AF → AP	苫前No.10	AJ	→ AJ	苫前No.17	AQ	→ AQ	浜頓別No.3	AW	→ AW
苫前No.4	AD	→ AD	苫前No.11	AK	→ AG	苫前No.18	AR	→ AS	遠別No.1	AX	→ AX
苫前No.5	AE	→ AE	苫前No.12	AL	→ AL	苫前No.19	AS	→ AC	遠別No.2	AY	→ AK
苫前No.6	AF	→ BB	苫前No.13	AM	→ AM	苫前No.20	AT	→ AZ	遠別No.3	AZ	→ BA
苫前No.7	AG	→ AF	苫前No.14	AN	→ AN						

4-4. 事故機の主軸履歴

(1) 1999 年 11 月～2011 年 12 月

事故機の主軸は上記期間苫前 7 号機に使われており、7 号機の主な保守点検履歴を整理すると表 4-4 の通りである。

2008 年 10 月の定期点検にて鉄粉濃度が管理値を超えたが、経過観察扱いとして運転状況を注視することとし、その後ショックパルス診断^{*1}を行った結果、判定は正常となった。その後の定期点検の際、再び鉄粉濃度が管理値を超えたため、再び経過観察扱いとして運転状況を注視してきた。

2011 年 12 月 23 日にエラー発生により風車が停止し、12 月 26 日に現地調査したところ、軸受の焼付きが確認された。

表 4-4 7 号機の主軸および軸受の保守点検履歴(軸受焼付きまで)

No.	日付	内容
1	2008 年 4 月 3 日	・ 定期点検 (半年)、軸受の鉄粉濃度=0.056%wt (管理値以内)
2	2008 年 10 月 1 日	・ 定期点検 (1 年)、軸受の鉄粉濃度=0.122%wt (管理値超) ・ 経過観察扱いとし、運転状況を注視することにした。
3	2009 年 4 月 20 日	・ 定期点検 (半年)、軸受の鉄粉濃度=0.090%wt (管理値超)
4	2009 年 10 月 8 日	・ 定期点検 (1 年)、軸受の鉄粉濃度=0.063%wt (管理値以内)
5	2009 年 12 月 16 日	・ 軸受のショックパルス診断を実施。判定は正常。
6	2010 年 4 月 2 日	・ 定期点検 (半年)、軸受の鉄粉濃度=0.084%wt (管理値超) ・ 再び経過観察扱いとし、運転状況を注視することにした。
7	2010 年 10 月 12 日	・ 定期点検 (1 年)、軸受の鉄粉濃度=0.096%wt (管理値超)
8	2011 年 4 月 7 日	・ 定期点検 (半年)、軸受の鉄粉濃度=0.099%wt (管理値超)
9	2011 年 10 月 25 日	・ 定期点検 (1 年)、軸受の鉄粉濃度=0.100%wt (管理値超)
10	2011 年 12 月 9 日	・ 巡視 (軸受焼付き直近の巡視)。 ・ 軸受から軽微な異音を確認。
11	2011 年 12 月 23 日	22:04 に以下のエラーが発生し、風車が停止。 ①G-sensor Activated ②Gen. heat PT100 ③Gearoil filter error ④Hyd. Oil level/temp error 強風 (23.7m/s_10 分平均) による悪天候のため、現地調査は天候回復を待って実施することにした。
12	2011 年 12 月 26 日	現地調査を行った結果、以下の様相を確認し、軸受の焼付きと判断。 ・ タワー昇塔途中から異臭があり、ナセル内は全面煤けた状況。 ・ 軸受のシール部が湾曲し、周辺部は真っ黒に焦げた状況。 ・ 主軸の中空部に配線されている制御ケーブルの被覆が溶融。

当社の軸受の鉄粉濃度管理値 : 0.07%wt 以下

^{*1} ショックパルス診断とは、軸受の転動体(ころ)と内外輪の接触に伴い、発生した圧力波(ショックパルス)を検出して、軸受を診断する手法。

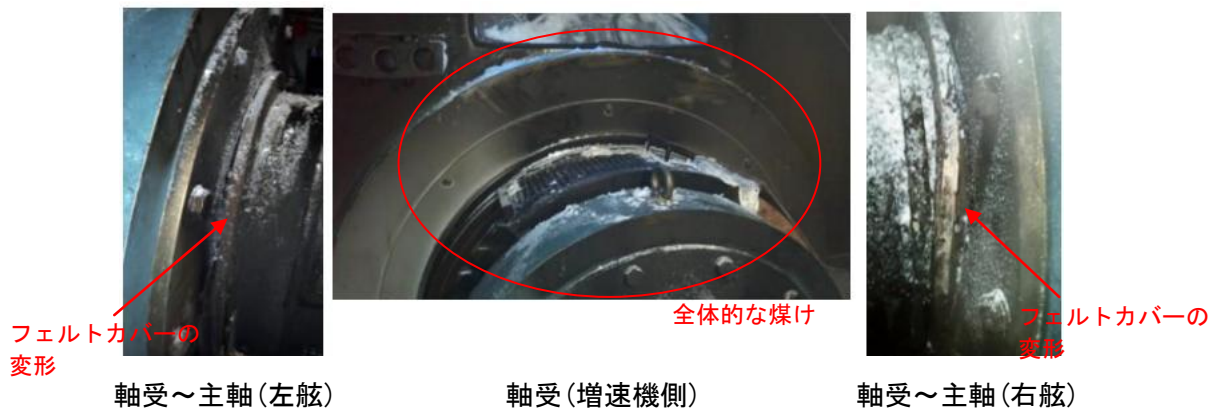


図 4-8 苫前 7 号機の軸受焼付き状況 (2011. 12. 26)

(2) 2012 年 1 月～2012 年 6 月

当該主軸および軸受を苫前 7 号機から降ろし、国内修理業者 (A 社) に搬入して修理を実施した。(修理期間：2012 年 3 月 26 日～2012 年 5 月 31 日)

A 社での分解後の写真を図 4-9～4-12 に示す。主軸の軸受取付部は損傷が著しく、外径が風車メーカー設計寸法よりも小さくなっていた。(風車メーカー設計：530mm、実測：526mm 程度)



図 4-9 主軸



図 4-10 軸受カバー



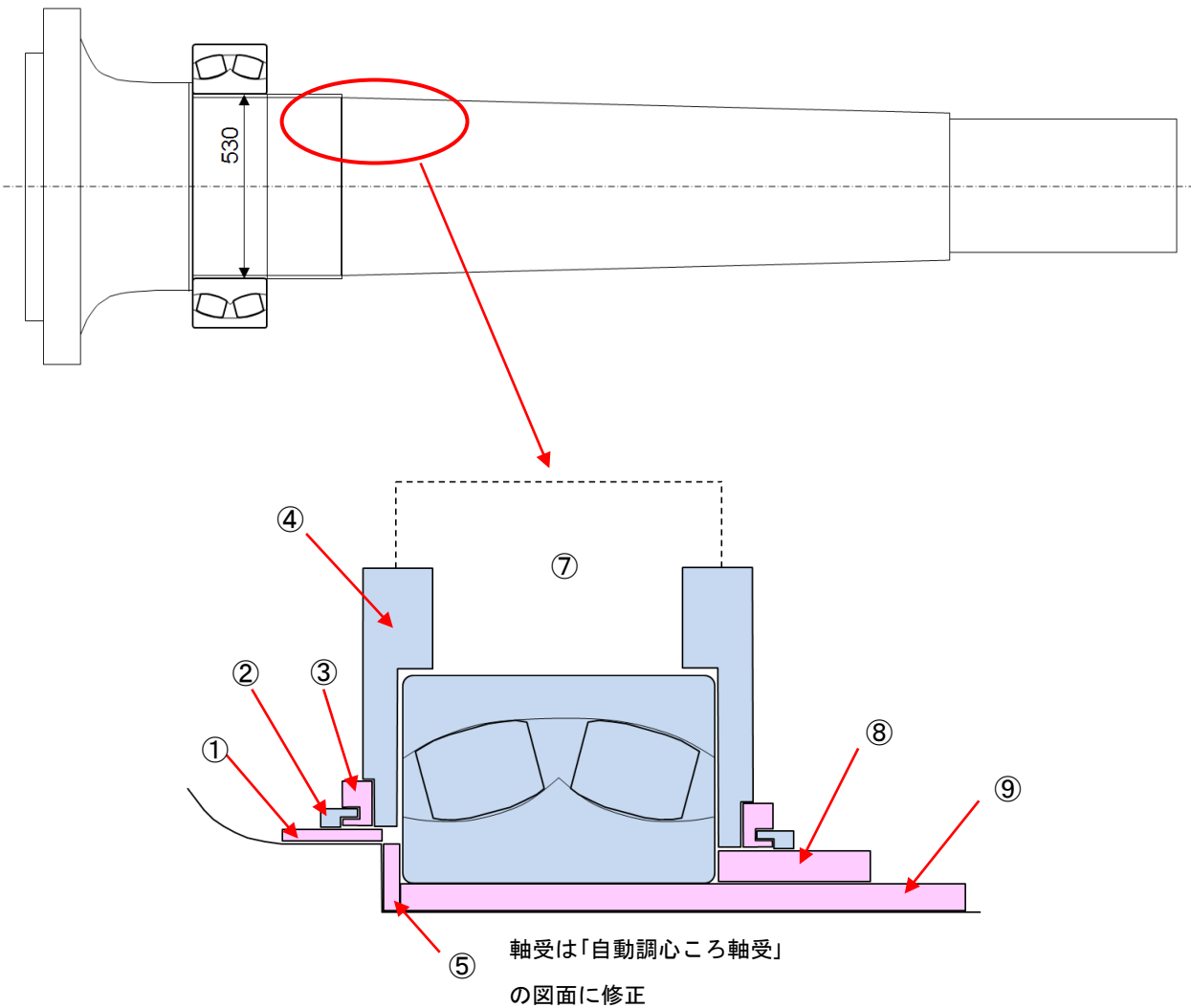
図 4-11 軸受固定リング



図 4-12 ラビリンスリング及びフェルトカバー

当該主軸および軸受の修理は、以下のように実施した。

- ①主軸の軸受取付部は損傷が著しいため、機械旋盤により直径 20mm 程度旋削し、細くなった部分には外径を設計寸法に合わせるため、厚み 10mm 程度のスリーブを焼き嵌めした。
- ②主軸段付き部は、曲率半径 R の加工は施していない。
- ③軸受、軸受カバー、ラビリンスリングは風車メーカーから購入し、A 社に支給した。



番号	品名	製作数	備考
1	グリスリング	1	製作
2	ラビリンスリング	2	支給品
3	フェルトカバー	2	製作
4	軸受カバー	2	支給品
5	主軸修正用リング	1	製作
6	軸受	1	支給品
7	軸受ハウジング	1	支給品
8	軸受固定リング	1	製作
9	主軸修正用スリーブ	1	製作

図 4-13 当該主軸および軸受の修理図

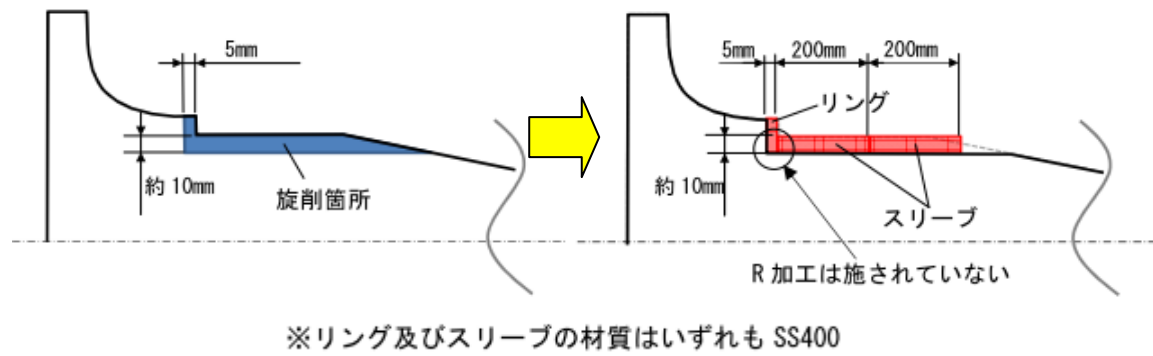


図 4-14 当該主軸の修理概要

事故発生後の現地調査にて、3つのリングが落下していた。それぞれのリング等の様相について、比較して整理したものは表 4-5 の通りである。

よって主軸破断面は、図 4-15 に記した通りといえる。(主軸破断面と破線の内側の部位が落下)

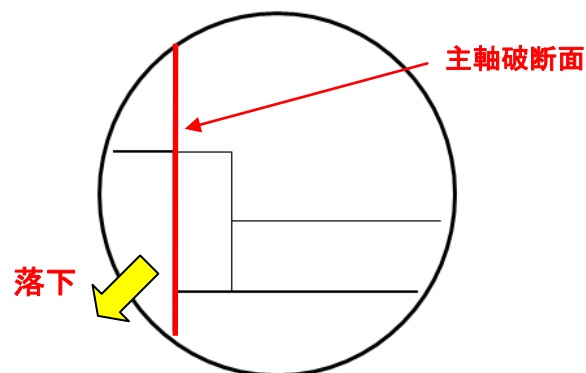


図 4-15 図 4-13 の主軸段付き部抜粋

表 4-5 落下したリングの対比

図 4-13, 4-15	図 3-2～3-4	説明
①グリスリング	リング B (図 3-3) 	・ A 社による製作品 ・ リングの一部に焼付き跡がある。 ・ 寸法(スケールによる実測) 厚さ：約 9mm～10mm 幅：80mm
②ラビリンスリング	リング C (図 3-4) 	・ 風車メーカーからの購入品を A 社に支給 ・ 変形あり ・ 寸法(スケールによる実測) 厚さ：約 12mm 幅：約 25mm
③フェルトカバー	リング A (図 3-2) 	・ A 社による製作品 ・ 変形あり ・ 寸法(スケールによる実測) 厚さ：約 25mm 幅：約 37mm

以上を整理すると、今回事故を起こした苫前 11 号機の主軸に関しては、

- ・ 軸受の焼付きの経緯があった。(苫前 7 号機にて)。
- ・ 国内修理業者 (A 社) にて修理を行った際、当社の指示が不十分であり、不適切な修理が行われた。

ことが明らかとなった。

5. 事故原因の究明

5-1. 事故原因の究明方針

今回の主軸破断は、直接的には「主軸の疲労破壊」に起因するものであるが、疲労破壊の発生原因については、以下の2通りが考えられた。

- ①主軸の不適切な修理（修理時期：2012年3月～2012年4月、運転再開：2012年6月）
風車メーカー原設計と異なる修理を行ったこと。即ち、主軸の径を20mm程度旋削し、更に主軸段付き部の曲率半径Rを施さず、当該部への応力集中を高める結果となったこと。
- ②軸受の焼付き（発生時期：2011年12月（7号機にて））
軸受の焼付きに伴い、主軸と軸受の内輪との間で摺動が発生し、主軸が高温となったことにより主軸の強度が低下し、亀裂が発生。
主軸修理にて、外周部分は旋削により削除されたが、疲労亀裂の一部が残り、その後の11号機の運転中に亀裂が進展した。

しかしながら、調査事実から導き出されたものは、今日までの観察結果等を考慮すると、①の事由（主軸の不適切な修理）に起因する可能性が極めて高いものと推定された。

- イ）原設計に基づき施された「曲率半径R」を、主軸の修理により削り取った措置は、主軸の応力集中を高め、当該部の疲労亀裂を招きやすくしていたこと。
- ロ）事故が直近の月例巡視から比較的短時間に発生しており、短時間に亀裂が進展したものと推定されたこと。

従って、「②軸受の焼付き」を考慮しつつ、「①主軸の不適切な修理」から発生したと考えられる亀裂の発生要因に焦点を当てて調査・検討を進めた。具体的には、以下のような項目につき調査検討を行い、主軸破断面を中心に亀裂の発生要因と亀裂伝播による破断メカニズムを解明して、事故原因の究明を行った。

A. 苦前11号機の破断面確認

主軸破断に至る亀裂発生メカニズム解明のため、破断面を顕微鏡で確認した。なお、ナセル上に残存している主軸破断面もナセルを降ろし確認した。また、亀裂がどの時点で発生したかを明らかにした。

B. 主軸段付き部の応力解析、亀裂発生評価、亀裂進展寿命等の定量的解析

主軸破断面の調査で明らかになった疲労破壊メカニズムを解明するため、主軸段付き部の応力解析、亀裂発生評価、亀裂進展寿命評価を行った

C. 同型機主軸詳細寸法測定、非破壊検査

事故機以外の同型機の状態確認と主軸破断メカニズム解明のために、現在A社で修理中の主軸（当社の浜頓別2号機から降ろしたもの）に加え、過去の運転履歴を考慮した上で、苦前の1、20、7号機から主軸を降ろし、外観目視点検と各所寸法測定と併せて、非破壊検査を実施した。

以下の調査を、苫前 1、20、7 号機を検査対象として選定したが、その理由は以下の通りである。

(1 号機)

軸受の鉄粉濃度が当社の管理値を超過。

(20 号機)

軸受破損が発生(2007 年 6 月)し、主軸および軸受交換後に長期間運転している。

(7 号機)

軸受破損が発生(2009 年 1 月)し、20 号機に次いで主軸および軸受交換後に長期間運転している。

5-2. 苫前 11 号機の破断面確認

(1) ハブ側主軸破断面（落下側）

破断した主軸を独立行政法人労働安全衛生総合研究所に移送し、主軸の破断面をビデオマイクロスコープ（ライカ DVM-2000）、電子顕微鏡（Scanning Electron Microscopy（以下 SEM と記す）、エリオニクス ERA8800-FE もしくは Keyence VE-9800）、レーザー顕微鏡（Keyence VK-9500）で観察した。

①主軸破断面の様相

- ・ 2 種類の特徴が確認された。
- ・ 領域 1 は、平坦な領域で疲労破壊の典型的な特徴であるビーチマークを 3 箇所確認した。
- ・ 領域 2 は、凹凸が激しい領域であり、最終破断部と推定した。

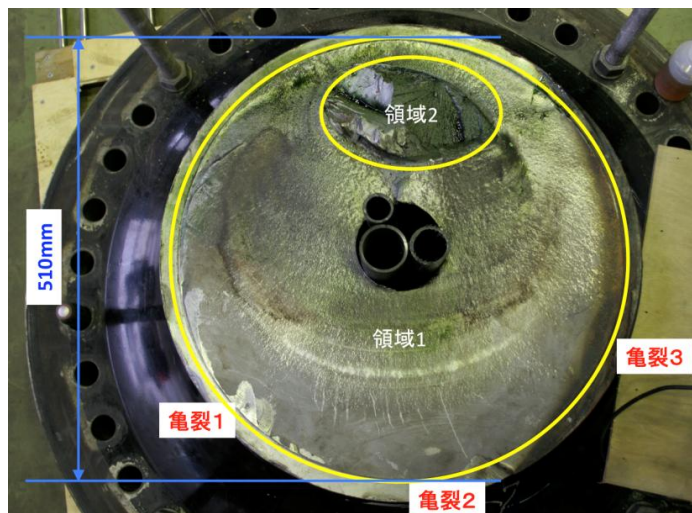


図 5-1 ハブ側主軸破断面（全体像）

②亀裂 1（領域 1）

- ・ 2 箇所の大きなステップ S1、S2（亀裂の発生・合体を示唆）を確認した（図 5-2 参照）。
- ・ ビデオマイクロスコープで観察したところ、ステップの起点が損傷しており明確に確認できなかったが、加工部から一旦凹むように進展した後、平坦な面を形成していた（以下、「破断面の傾き」と記す^{*3} P36 参照）（図 5-3、5-4 参照）。



図 5-2 亀裂 1 の様子

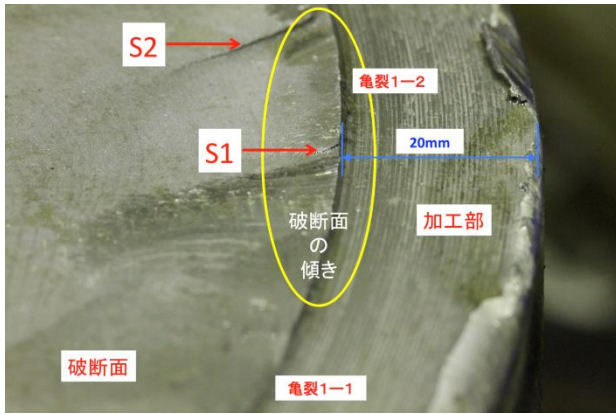


図 5-3 破断面の傾き（亀裂 1-1）

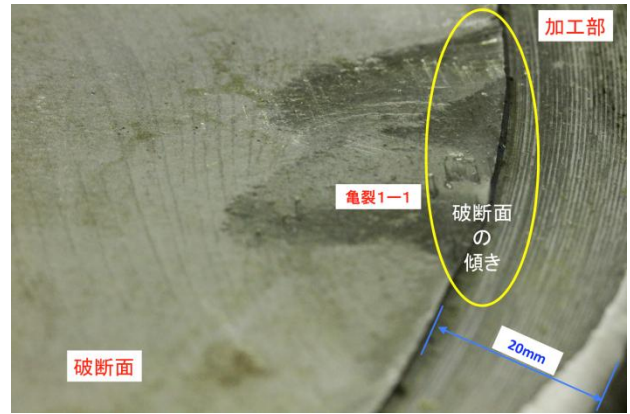


図 5-4 破断面の傾き（亀裂 1-2）

③亀裂 2（領域 1）

- ・長さ 0.5mm 程度のステップを 2 箇所を確認し、亀裂 2 はこの付近から発生したと想定（図 5-5、5-6）。
- ・ステップ S3 について、レプリカを作成し電子顕微鏡で観察したところ、切削加工時のバイト（タングロイ製 TNMG220412-SS T6030）による筋状の模様とは異なる模様が確認され、これは、加工の際にできた傷（以下、「加工傷」と記す）であることが分かった（図 5-7）。
- ・破断面の傾きはほとんど観察されなかった。（図 5-8）
- ・亀裂 2 は、R が不足していたことと同時に、加工傷によって応力が集中し、疲労亀裂が発生したと想定した。

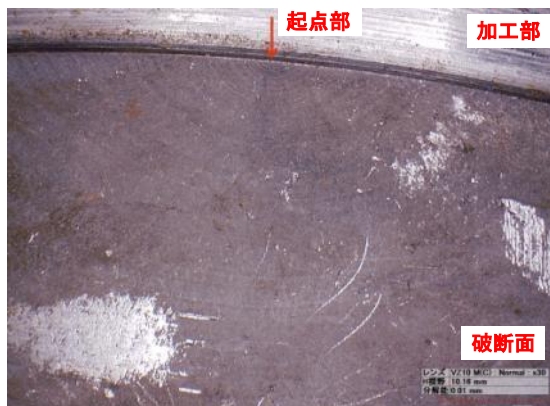


図 5-5 亀裂 2 の様子

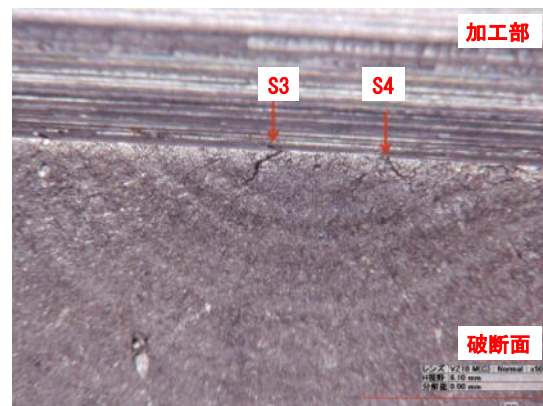


図 5-6 亀裂 2 のステップ

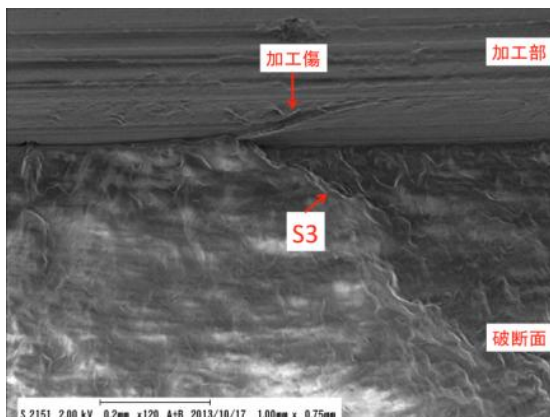


図 5-7 亀裂 2 S3 周辺の SEM 像

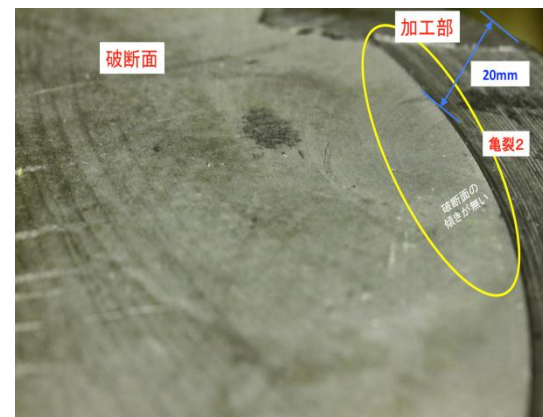


図 5-8 破断面の傾き（亀裂 2）

④亀裂3（領域1）

- ・ 亀裂3の周辺は高温（500℃程度と推定）による高温酸化や赤錆の影響で起点部が不明確であることから、中性除錆材シュンマを用いて錆を取り除いた後に観察したが、明確なステップは確認できなかった。（図5-9、5-10）。
- ・ 亀裂の面に対して上下方向の進展は、加工部から一旦凹むように進展した後、平坦な面を形成していた（図5-11）。

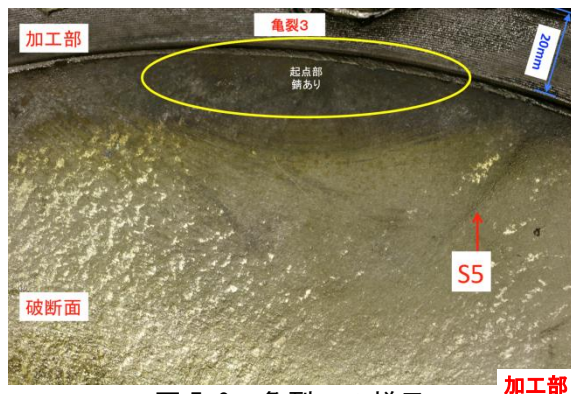


図 5-9 亀裂3の様子

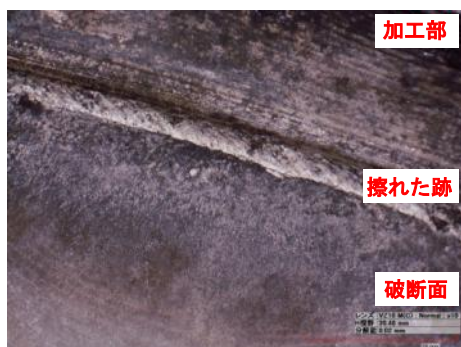


図 5-10 亀裂3の様子（除錆後）

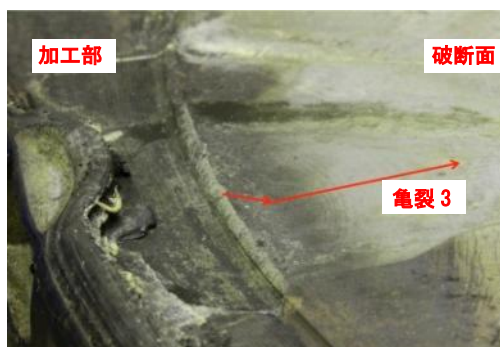


図 5-11 亀裂3の上下方向の進展

⑤領域2

- ・ レプリカを作成し、SEMで観察したところ、典型的な擬へき開^{*2} P.35 参照の様相を確認し、最終破断部であることを確認した（図5-12）。

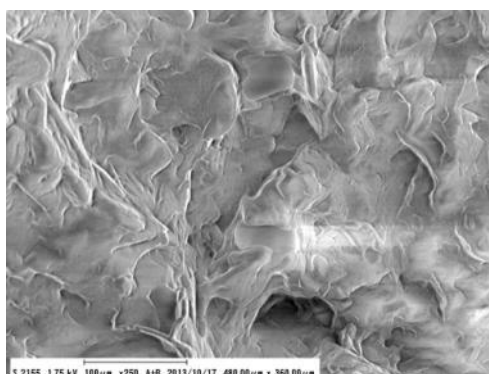


図 5-12 領域2のSEM像

(2) ナセル側主軸破断面

ハブ側と比較して損傷部の面積は狭く、ビーチマークの小さな起点部に明確なステップは観察されなかったため、レプリカ(丸本ストルアス製レプリキット F1)を作成し、SEM を使用して起点部を観察した。

① 亀裂 1

- ・ 亀裂 1-1 の起点部の様子を図 5-13 に示す。微小なステップを観察した(図 5-13)。
- ・ 亀裂 1-2 は、起点部が損傷しておりステップは観察できなかった(図 5-14)。

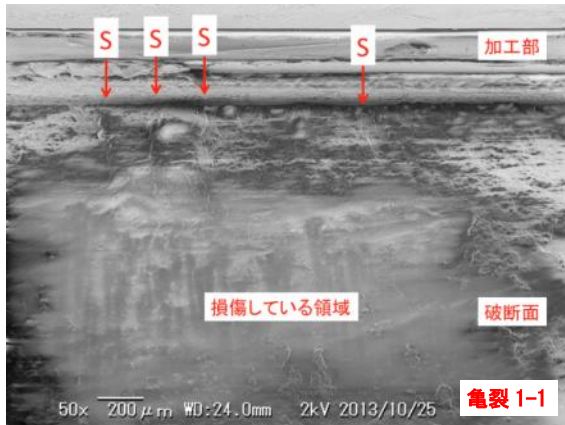


図 5-13 亀裂 1-1 の起点部レプリカ SEM 像

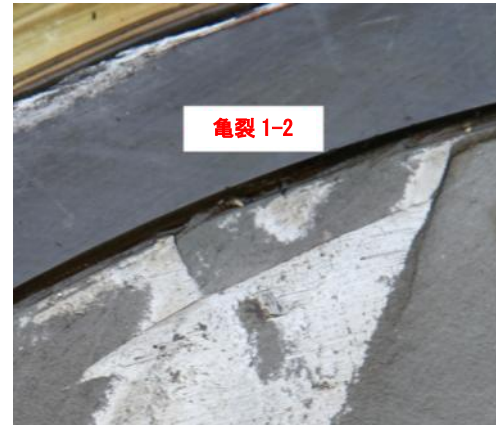


図 5-14 亀裂 1-2 の起点部損傷状況

② 亀裂 2

- ・ 亀裂 2 のナセル側の写真を図 5-15 に示す。明瞭なビーチマークを観察した。
- ・ ナセル側を観察する前に、ハブ側の破断面でステップを観察した。亀裂 2 のナセル側については、ハブ側の破断面と一対の鏡の関係であることから、これ以上の観察は行わなかった。

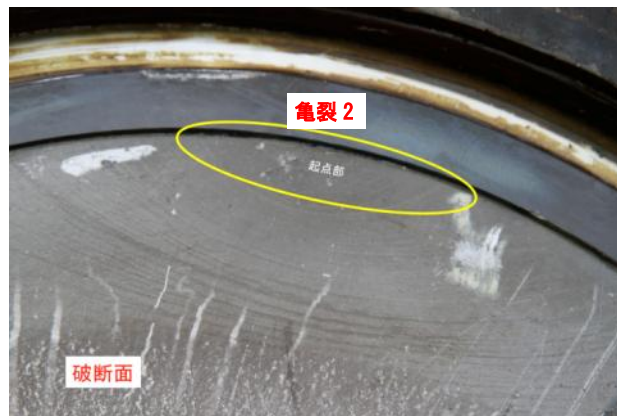


図 5-15 亀裂 2 の破断面状況

③ 亀裂 3

- ・ ハブ側で見られた高温酸化はしていない。レプリカを作成し、起点部の観察をしたところ、無数の微小のステップを観察した(図 5-16 レプリカの SEM 像を参照)。

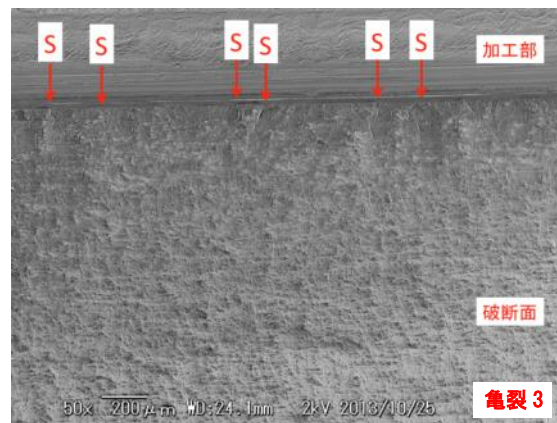
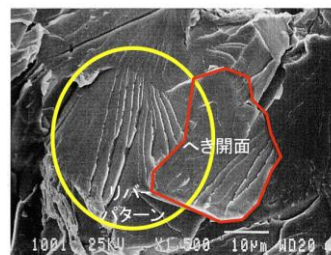


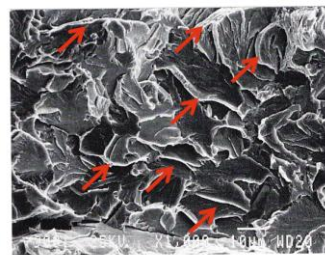
図 5-16 亀裂の起点部レプリカ SEM 像

*2 【擬へき開】

時間非依存型破壊の一つである脆性破壊を起こした鉄鋼の破断面はへき開（結晶中の割れやすい面）で割れている。そしてへき開面の上にはリバーパターンと呼ばれる模様が観察される。擬へき開の破断面は、へき開面で割れており、リバーパターンは観察されるが、結晶粒界ではまくれたような延性破壊を起こしている破断面のことである。



へき開
シャルピー衝撃試験
S25C -196℃



擬へき開
シャルピー衝撃試験
低合金鋼 室温

これらを整理した結果を、表 5-1～5-3 に示す。“○” は存在が確認されたこと、“×” は存在が確認されなかったこと、“-” は破断面が共役であることからハブ側で確認できている、もしくは損傷により観察できないため確認を行っていないことを示す。

表 5-1 ハブ側主軸破断面の確認結果

判断基準	亀裂1		亀裂2	亀裂3
	1-1	1-2		
1:ステップ	× (損傷)	× (損傷)	○	×
2:破断面の傾き	○	○	×	○

表 5-2 ナセル側主軸破断面の確認結果

判断基準	亀裂1		亀裂2	亀裂3
	1-1	1-2		
1:ステップ	○	× (損傷)	-	○
2:破断面の傾き	-	-	-	-

表 5-3 主軸破断面確認の総合判定結果

判断基準	亀裂1		亀裂2	亀裂3
	1-1	1-2		
1:ステップ	○	× (損傷)	○	○
2:破断面の傾き	○	○	×	○
原因	加工不良	加工不良	加工不良 加工傷	加工不良

(判断基準)

- 1) 焼付き時の高温が原因 : ステップも破断面の傾き*³ も観察されない
- 2) 加工形状不良が原因 : ステップもしくは破断面の傾きが観察される

*³ 【破断面の傾き】

段付き構造の R 部に生じる疲労は、応力集中の影響により、亀裂発生当初は、図 5-17 に示すような傾いた面を形成し、その後、応力に垂直な面を形成し、これを“破断面の傾き”と呼ぶ。

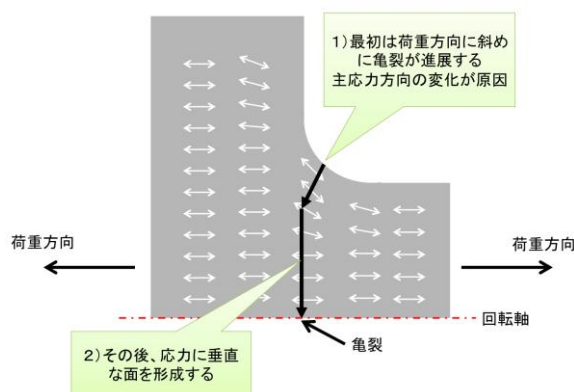


図 5-17 段付き構造の R 部に発生する疲労亀裂の進展経路

(3) 加工後の曲率半径 R の計測

亀裂 2 の起点付近でレプリカを採取し、断面をレーザー顕微鏡で観察して R の計測を行った。水平距離と高低差から R を計算すると、 $R=1.72\text{mm}$ であった。

(4) まとめ

以上を総合的にまとめると、以下の結論となった。

- ・ 主軸は疲労破壊により破断した。
- ・ 亀裂は肉眼で観察可能な大きさでは、4箇所から発生した。
- ・ 亀裂は全て加工不良(曲率半径 R の不足・加工形状不良)による応力集中を原因としている。
- ・ 特に亀裂 2 は応力集中だけでなく、加工傷も亀裂発生の原因である。
- ・ $R=1.72\text{mm}$ であった。

5-3. 主軸段付き部の応力解析・亀裂発生・亀裂進展寿命等の定量解析

前節より主軸は疲労により破断したことが明らかになった。本節では、破断に至るプロセスを検証するために、主軸段付き部の応力解析・疲労発生寿命評価と、亀裂進展寿命評価の二段階の定量的評価を行った。定量解析のフローを図 5-18 に示す。

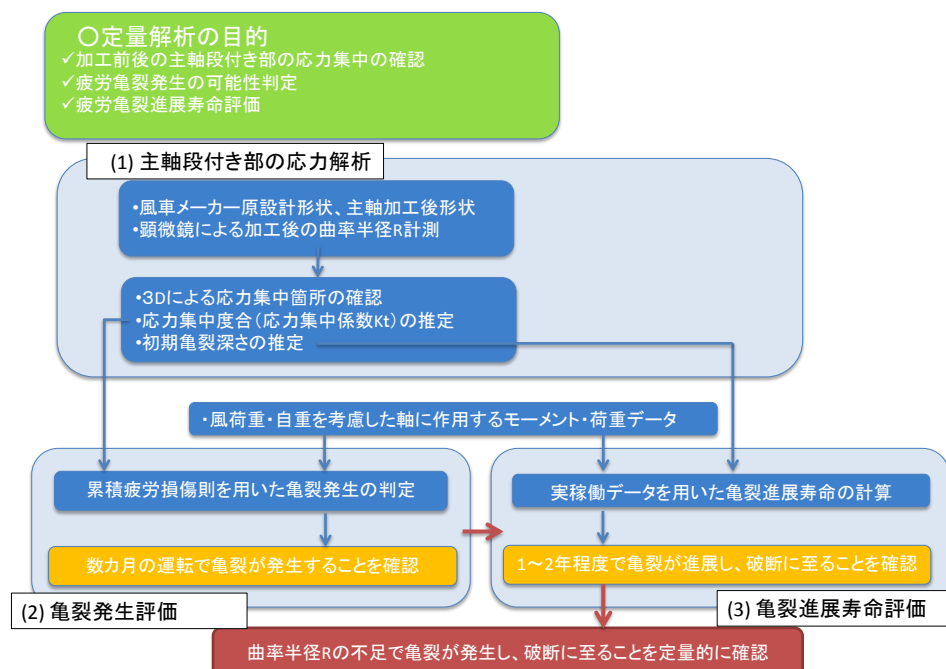


図 5-18 定量解析フロー図

(1) 主軸段付き部の応力解析

5-2 苫前 11 号機の破断面の観察から得られた段付き部の曲率半径 ($R=1.72\text{mm}$) を所与として、有限要素法 (FEM) により主軸段付き部の応力解析を行った。応力解析にあたっては、まず、全体解析により主軸全体の解析を行い、主軸全体に作用する応力から R 部の応力集中係数 (K_t) を求めた。また、R 部の詳細解析を行い、亀裂進展寿命評価の初期値として使用する初期亀裂深さを推定した。

①解析手法

有限要素法 (使用ソフト: NX Nastran v8.5) を用いて、風車主軸段付き部の応力解析 (弾性線形解析) を行った。なお、解析は下記の 4 ケースについて行った。

- ・修理前の形状 (1 ケース) : 主軸 (直径 530mm) 段付き部曲率半径 R10 が施されている場合 (風車メーカー原設計形状)
- ・修理後の形状 (3 ケース) : 主軸径を 20mm 削り (直径 510mm)、主軸段付き部での曲率半径を R1、R2、R4 とした場合

風車主軸は、六面体ソリッド要素と三角柱ソリッド要素でモデル化した。また、解析対象が風車主軸である事より、翼およびハブはモデル化しなかった。ただし、翼およびハブを介して、風車主軸に作用する荷重を考慮する為、翼中心には軸力などを作用させる為の節点を、主軸断面中心には、曲げモーメントを作用させる為の節点を設け、これらの節点と主軸間に剛体要素を配置した。

剛体要素では、6 自由度（X 方向並進自由度、Y 方向並進自由度、Z 方向並進自由度、X 軸回転自由度、Y 軸方向回転自由度、Z 方向回転自由度）に対する主従関係を定義しており、所定の軸力や曲げモーメントなどが、風車主軸に作用するようにしている。

本解析では剛体要素を介して曲げモーメントも作用させるが、剛体要素を介した事による数値誤差などにより、定義した曲げモーメントとの僅かな誤差が生じるかもしれない。そこで、念のため、主軸断面中心に節点を配置し、その節点に曲げモーメントを作用させる事で、その誤差が生じるのを低減させることを試みた。

主軸全体のフリーボディダイアグラムでは、ハブ側とナセル側で均等なモーメントが作用している釣合状態で、主軸段付き部から約 98mm の位置が支点と考える事ができる。そこで、主軸全体をモデル化するのではなく、「翼側端部－主軸段付き部から約 98mm の位置」までをモデル化した。

図 5-19 に解析モデルを、図 5-20 に支持条件を示す。翼中心にある節点には、図 5-19(a) のように、Rotor mass (翼とハブの重量) と軸力 F_y を作用させた。ただし、Rotor mass は集中荷重として定義している。一方、主軸断面の中心にある節点には、図 5-19(b) のように、曲げモーメント M_x 、 M_y 、 M_z を作用させた。

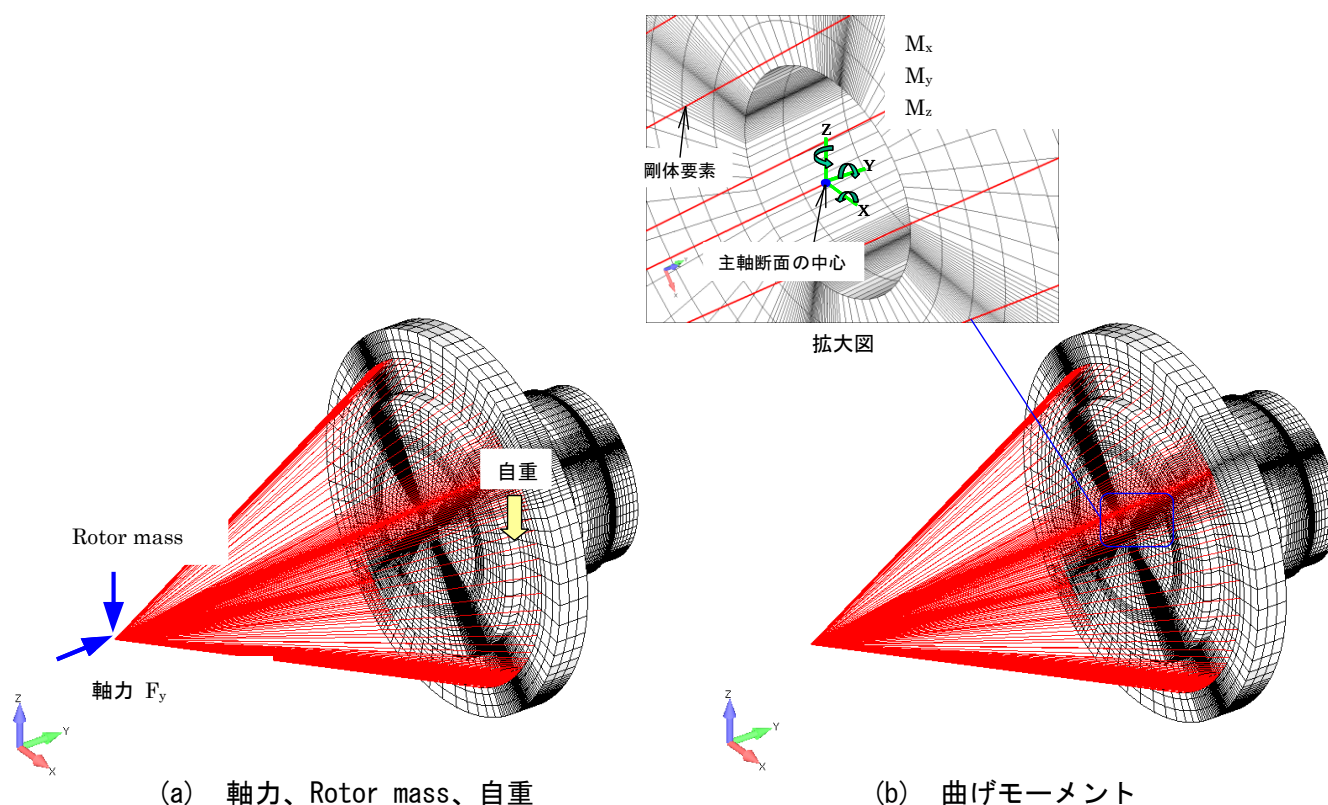


図 5-19 解析モデル

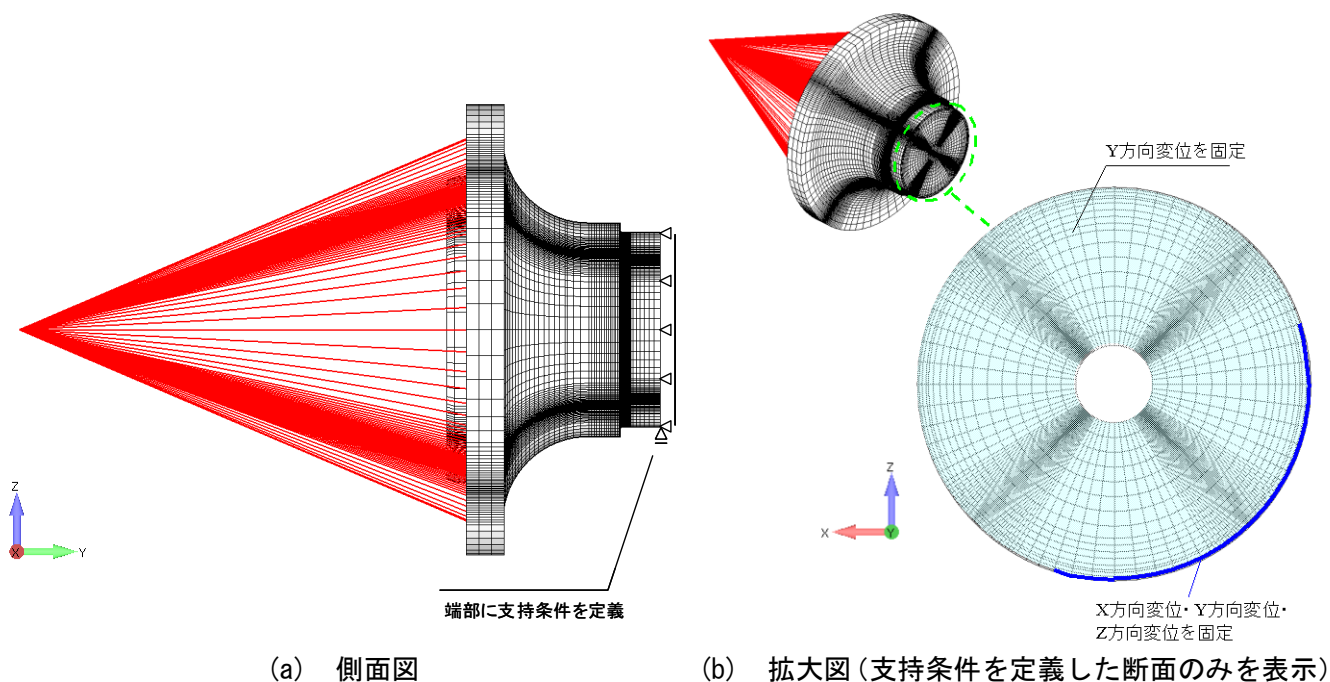


図 5-20 支持条件

表 5-4 に解析で用いた物性条件を示す。

表 5-4 Fe510d の物性条件

弾性係数 (MPa=N/mm ²)	203,000
ポアソン比	0.3
質量密度 (N/mm ³ ・sec ² /mm)	7.85×10^{-9}

R1.72 (実測形状) の応力集中係数を正確に求めるため、段付き部の詳細解析を行った。詳細解析の結果から、R1、R2、R4 のそれぞれの応力集中係数 (K_t) は最大応力 ($\sigma_{\max}$) を平均応力 (250MPa) で除して求めた。R と K_t の関係から近似曲線を引き、R1.72 のときの K_t を求めた。

初期亀裂深さは降伏領域の深さと考え、R の中心から最大主応力点を通る線を引き、降伏域の境界と交わる点を求めた。そして、最大主応力点の表面からの深さを降伏域の深さとした。

②解析結果

有限要素法による主軸段付き部（R10 と R2）の解析結果を図 5-21～5-24 に示す。設計形状の R10 に比べて、加工後形状（R2）の R 部に応力が集中していることが分かる。

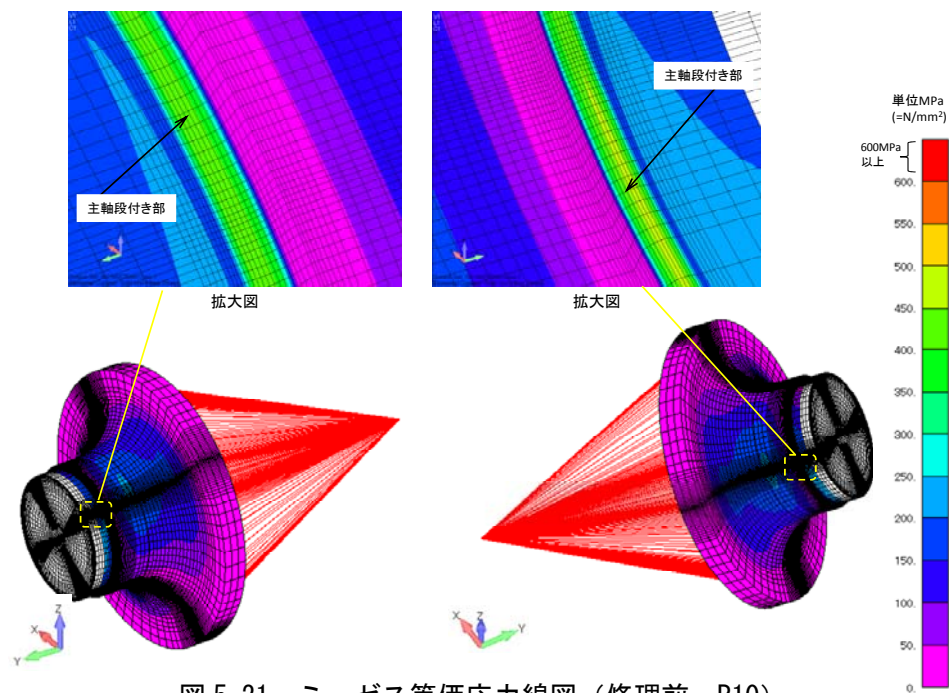


図 5-21 ミーゼス等価応力線図（修理前：R10）

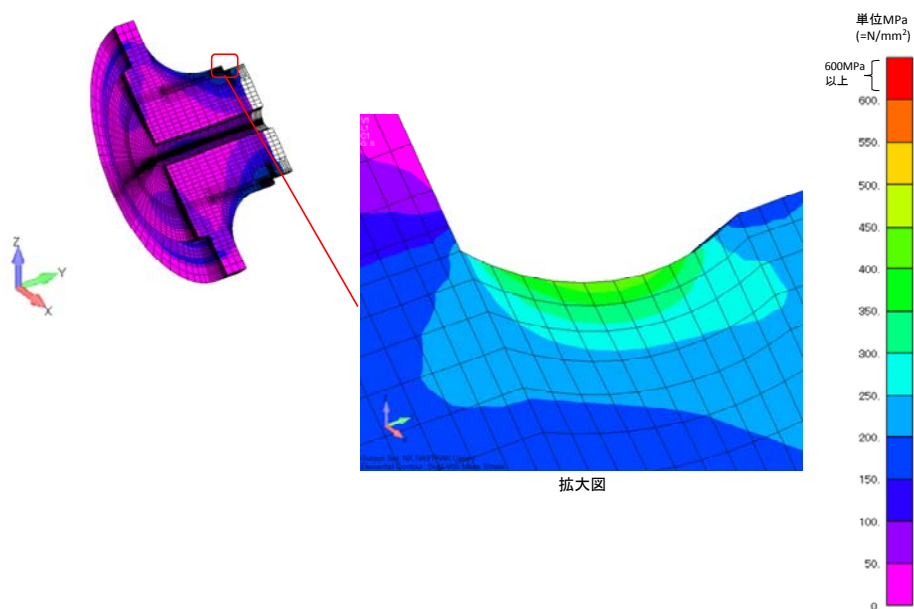


図 5-22 ミーゼス等価応力線図－断面－（修理前：R10）

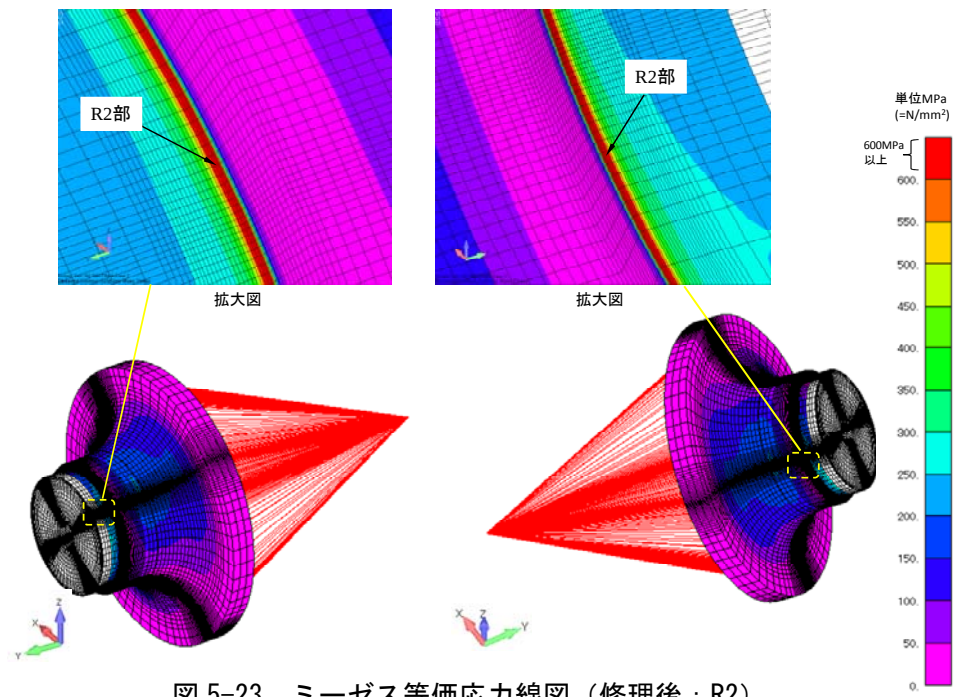


図 5-23 ミーゼス等価応力線図（修理後：R2）

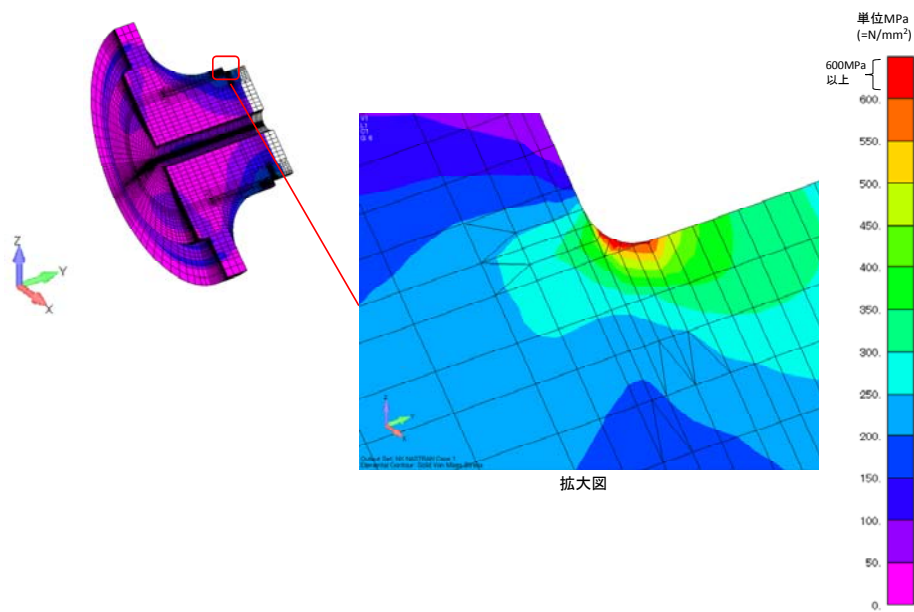


図 5-24 ミーゼス等価応力線図－断面－（修理前：R2）

FEM 解析の結果より、下表の通り曲率半径 R1、R2、R4 の応力集中係数 (K_t) が得られた。

表 5-5 曲率半径による応力集中係数

曲率半径	応力集中係数 (K_t)
R1	4.77
R2	3.52
R4	3.11

上記の値から近似曲線を作成し、実際の曲率半径 R1.72 での応力集中係数を求めたところ、 $K_t(R1.72)=3.86$ を得た。近似曲線の決定係数は 0.984 であり、近似曲線として充分と判断した。なお、R10 の応力集中係数については Peterson' s Stress Concentration Factors (Wiley) を参考に $K_t(R10)=2.3$ (主軸直径 510mm) とした。(図 5-25)

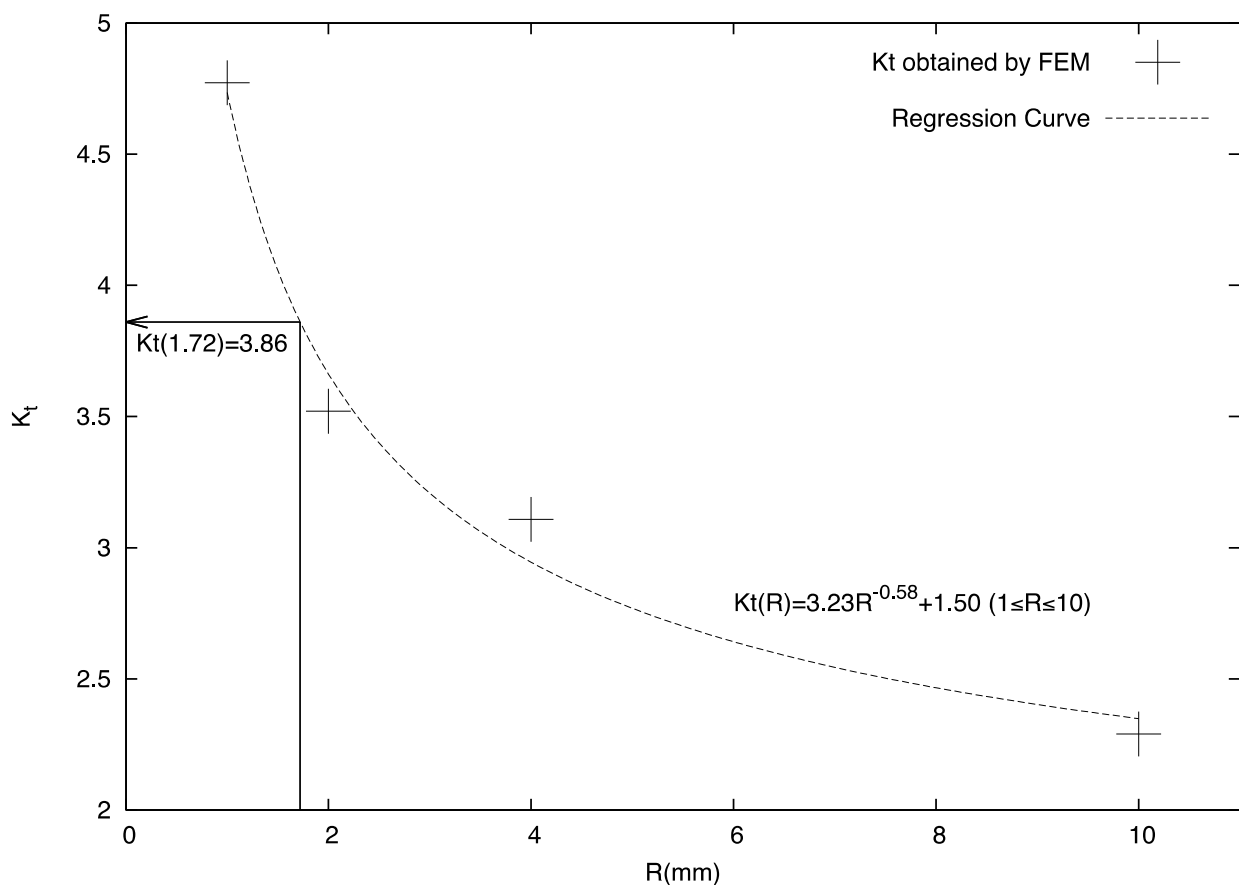


図 5-25 FEM 解析による応力集中係数近似曲線

また、FEM の詳細解析による応力線図をもとに、応力集中点の降伏領域から、初期亀裂深さを推定した。一般的に材料の降伏は最大主応力もしくはミーゼス相当応力と降伏点との大小で判断する。最大主応力で考えたとき、初期亀裂深さ (a_0) は 3.29mm となり、ミーゼス相当応力で考えたとき、 $a_0=1.31$ mm となった。近似曲線の決定係数は、最大主応力のとき 0.999、ミーゼス相当応力のとき 0.975 であり、両近似曲線として充分と判断した。(図 5-26)

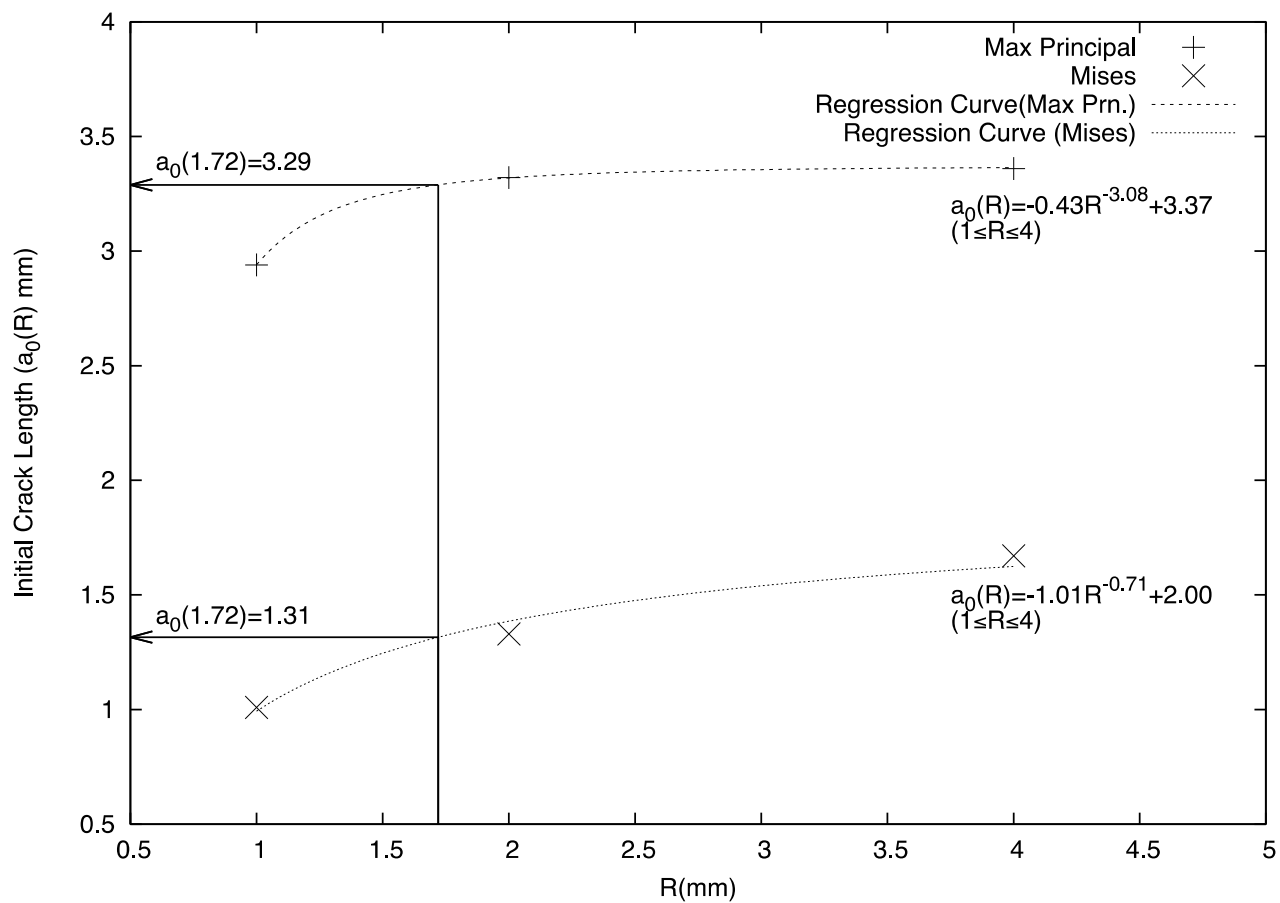


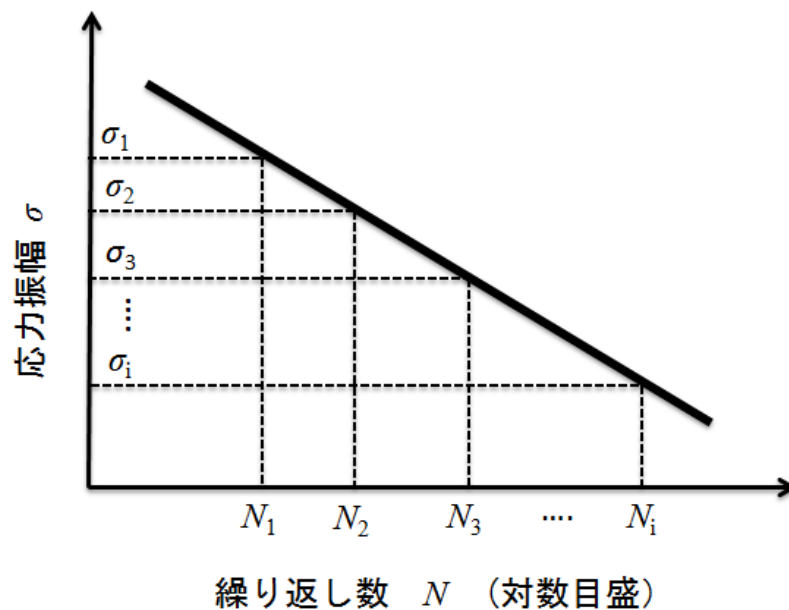
図 5-26 初期亀裂深さの推定

(2) 疲労亀裂発生評価

疲労亀裂発生寿命評価では、風荷重を考慮した軸に作用するモーメント、自重、荷重データに対し、上で求めた応力集中係数を加味して、累積疲労損傷則を用いて加工後形状で R 部に疲労亀裂が発生し得るか判定を行う。判定を行うにあたり、想定される実働応力振幅に対し、R10 では 20 年間、R1.72 では 1 年相当の繰返し数を与え、修正マイナー則により補正された S-N 曲線に基づく累積疲労損傷則により各応力振幅に応じた損傷度の和を求め、疲労亀裂発生の有無を判定した。

①解析手法

累積疲労損傷則(マイナー則補正)



$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_i$ の応力振幅が発生していたとして、その時の破断までの繰返し回数を S-N 曲線から読み取り、 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$ とする。これらの応力振幅がそれぞれ $n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$ 回繰返された時、その損傷度を $n_1/N_1, n_2/N_2, n_3/N_3, \dots, n_i/N_i$ とする。

累積疲労損傷則では、それら個々の損傷度の和を全体の損傷度 D とする。そして $D \geq 1$ になった時に疲労破壊が起こると考える。

$$D = n_1/N_1 + n_2/N_2 + \dots + n_i/N_i = \sum n_i/N_i$$

$D \geq 1$: 疲労破壊が起こる

$D < 1$: 疲労破壊しない

(CAE 技術者のための情報サイト <http://jikosoft.com/cae/engineering/strmatf1.html>) より

②解析結果

原設計形状（R10）での 20 年間の損傷度（D）を求めたところ、D(R10)は 10^{-2} のオーダーの数値となり、疲労破壊が起こる 1 より小さい値となった。

一方、旋削後形状（R1.72）では、実働応力振幅に対する 20 年間の繰り返し数の 1/20（1 年間相当）の繰り返し数を与え、等価応力には R10 と R1.72 の応力集中係数の比（ $1.84=3.86/2.1$ ）を乗じ、累積疲労損傷則により損傷度を求めたところ、D(R1.72)=5.04 を得た。

すなわち、設計形状の R10 では 20 年間の運転期間中に疲労破壊による亀裂発生は起らないのに対し、加工後の R1.72 では、数カ月以内の運転で疲労破壊による亀裂が発生するとの評価が得られた。

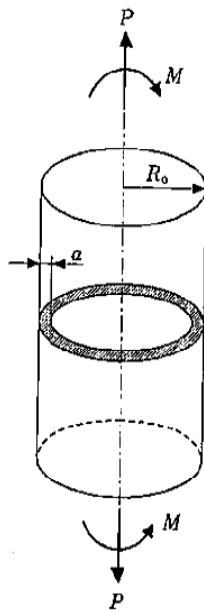
(3) 亀裂進展寿命評価

疲労亀裂の発生を仮定し、亀裂進展速度式 ($da/dN = C\Delta K^n$ 、 da/dN : 繰返し応力 1 回当たりの亀裂進展深さ、 ΔK : 応力拡大係数、 C 、 n : 材料定数) に実働応力振幅を与え、破断に至るまでの繰返し数 (風車が回転した数) を求めた。風車が回転した数と、実際の運転開始から破断までの日数との関係から換算式を求め、破断に至るまでの寿命を評価した。

① 解析手法

丸棒の亀裂進展プログラム

下図に示す丸棒の周方向全周亀裂進展を計算するプログラムでの計算処理を示す。



[計算式]

$$K = (F_m \sigma_m + F_b \sigma_b) \sqrt{\pi a}$$

$$F_m = 0.5 \sqrt{\zeta} (1 + 0.5 \zeta + 0.375 \zeta^2 - 0.363 \zeta^3 + 0.731 \zeta^4)$$

$$F_b = 0.375 \sqrt{\zeta} (1 + 0.5 \zeta + 0.375 \zeta^2 + 0.313 \zeta^3 + 0.273 \zeta^4 + 0.537 \zeta^5)$$

$$\zeta = 1 - \frac{a}{R_0}$$

K : 応力拡大係数

a : 初期亀裂深さ

R_0 : 初期半径

σ_m : 膜応力

σ_b : 曲げ応力

ここでは、曲げ応力に風荷重を考慮したメーカーの設計許容繰返し数を応力振幅ごとに 1000 分割したものを用いた。また、膜応力 σ_m はゼロとした。

亀裂進展速度式： $da/dN = C\Delta K^n$

JSME 維持規格（大気中および内部亀裂）より

$$C = 3.88 \times 10^{-12} S$$

$$n = 3.07$$

$$S = 25.72(2.88 - R)^{-3.07}$$

[単位： da/dN (meter/cycle)、 ΔK (MPa $\sqrt{\text{meter}}$)]

なお、圧縮側の応力は亀裂進展に寄与しないので、応力比 $R=0$ （片振り）とした。

（「構造健全性評価ハンドブック」構造健全性評価ハンドブック編集委員会編、代表 小林英男）より

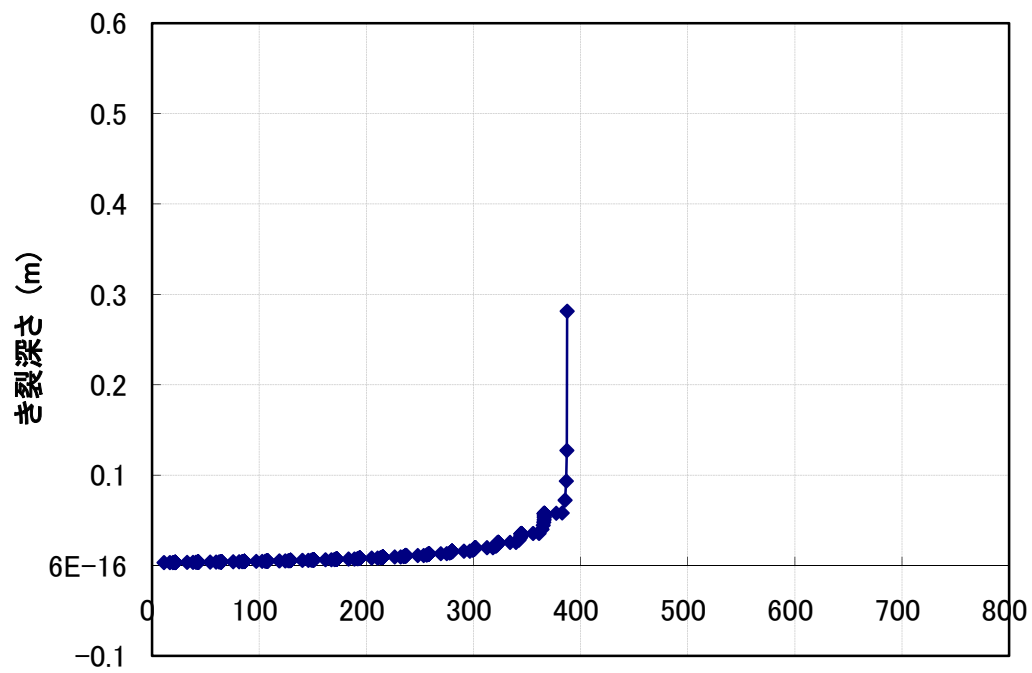
上記の計算式より、初期亀裂深さ a を与えると、 F_b が得られ、この時の応力振幅 σ_b を与えると応力拡大係数 ΔK を得られる。求めた ΔK を上記の亀裂進展速度式（ $da/dN = C\Delta K^n$ ）に代入し、 $dN = 1$ cycle とすると、風車一回転当たりの亀裂進展距離 da/dN となる。

得られた風車一回転当たりの亀裂進展距離に加え、上記と同様の計算を亀裂長さが主軸半径に達するまで繰返すことにより、破断に至るまでの繰返し数を得る。

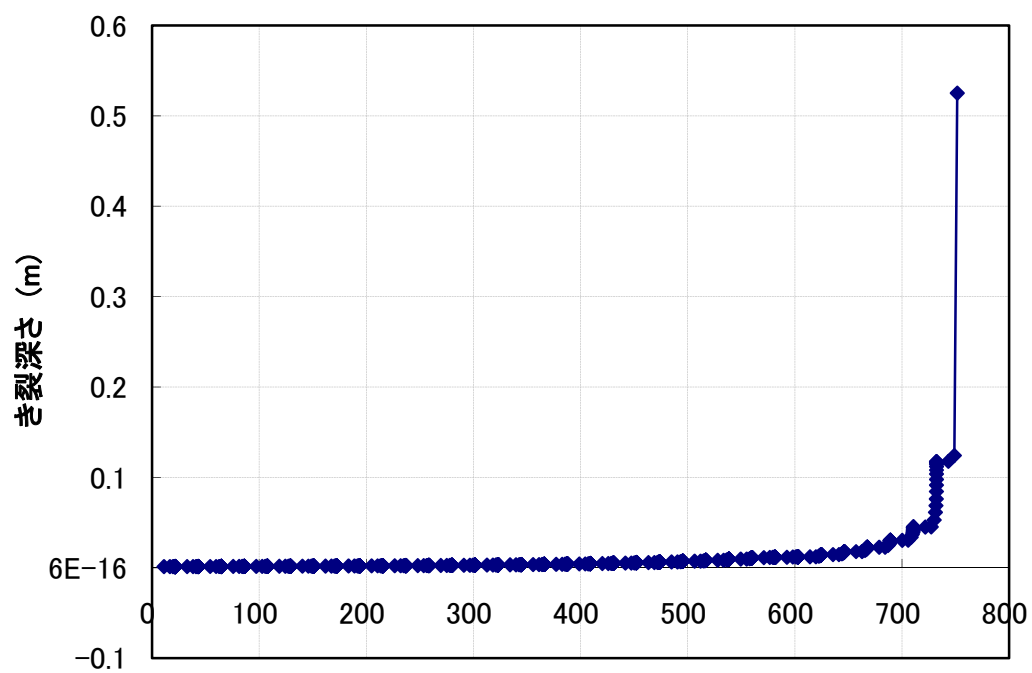
なお、繰返し数から日数を求めるために、実際の苫前 11 号機の SCADA データの 10 分間ロータ回転数 (rpm) 瞬時値を 10 倍して実回転数と見なし、運転再開から破断に至るまでの日数（462 日）分を積算して、回転数（8,407,030 回転）から日数を換算した。（18,200 回転/日）

②解析結果

5-3(1)の有限要素法による応力解析から求めた初期亀裂 1.31mm または 3.29mm を所与として亀裂進展計算を行い、破断に至るまでの寿命(日数)を求めた所、初期亀裂 3.29mm のとき約 390 日、初期亀裂 1.31mm のとき約 730 日となり、運転開始から 1~2 年で破断に至るとの結果を得た。実際には、剪断モードも加味され、亀裂の非対称性に伴う偏心効果、実風荷重データとの相違等もあるため、完全には一致しないが、実際に破断に至った日数（462 日）に相当した。（図 5-27）



亀裂進展寿命 (日数) (初期亀裂深さ3.29mm)



亀裂進展寿命 (日数) (初期亀裂深さ1.31mm)

図 5-27 亀裂進展寿命(日数)

5-4. 超音波探傷検査

前述の通り、主軸に亀裂があると同様の事故を発生する可能性があることから、同様の事故の発生を防ぐために同型機の状態を確認することとし、同型機全機（25機）を対象に風車メーカーによる超音波探傷検査を実施した。なお、超音波探傷検査の採用理由は、ナセル上の主軸には軸受部に軸受カバーが付いているため、軸受部や曲率半径 R 部の寸法測定、ならびに浸透探傷検査や磁粉探傷検査は実施不可であるためである。

(1) 実施方法

- ・ 超音波センサーの送受信プローブを主軸の曲面に沿って 360 度動かし、超音波検査装置にてデータを採取して、亀裂の有無を判別する（図 5-28）。（超音波検査装置：Somotron NDT 社“ISONIC2005”）
- ・ 風車メーカー工場にて、同型主軸にグラインダーで長さ 200mm、深さ 18mm の模擬損傷を作り、同装置でデータ採取。同装置にて主軸の損傷を検出可能であることを事前に確認のうえ、同型機全機に対する超音波探傷検査を実施（図 5-29）。

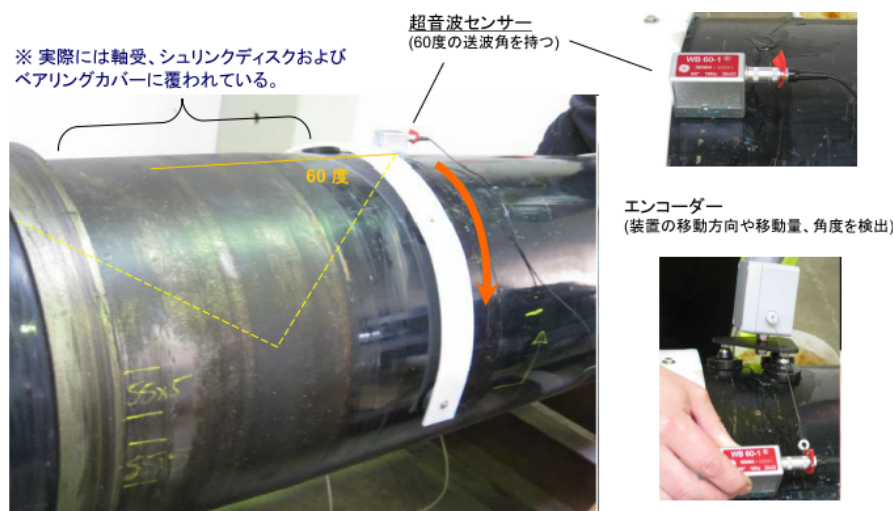


図 5-28 超音波探傷検査の実施方法

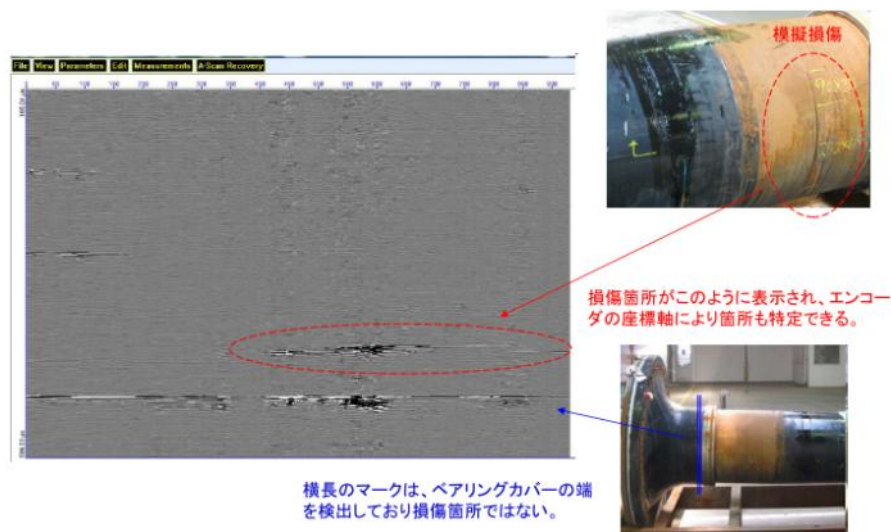


図 5-29 同型主軸の模擬損傷と超音波探傷検査結果

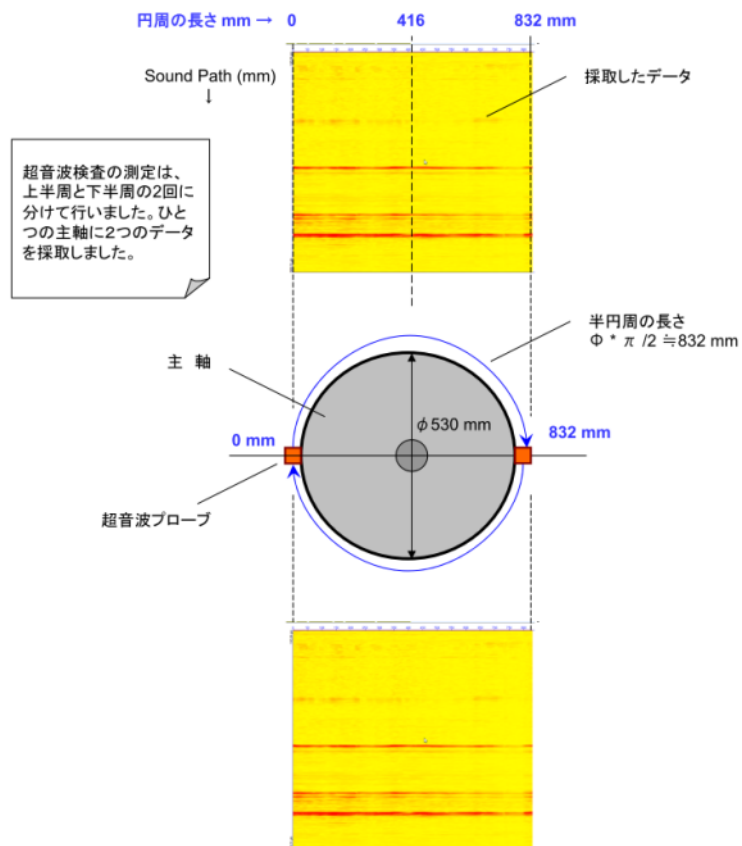


図 5-30 超音波センサーの走査方法

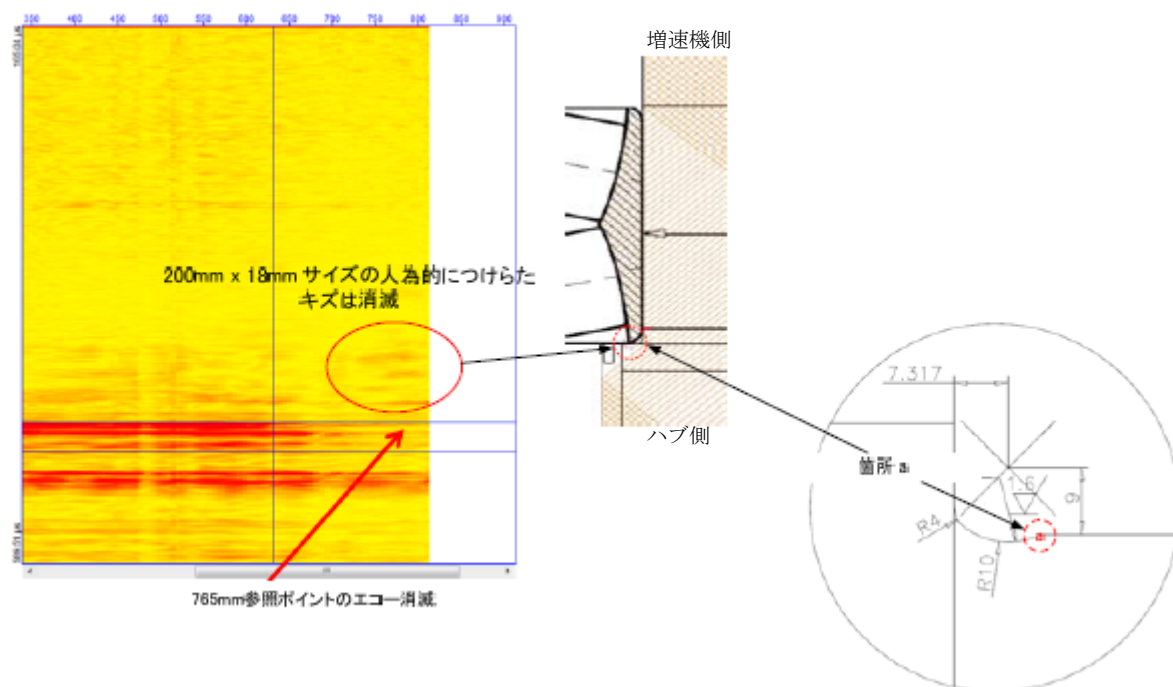


図 5-31 超音波探傷検査データの見方

(2) 実施結果

図 5-32 は、超音波探傷検査結果の一例として、苫前 GHWP7 号機データを示す。亀裂・損傷を示唆するデータは確認されなかった。

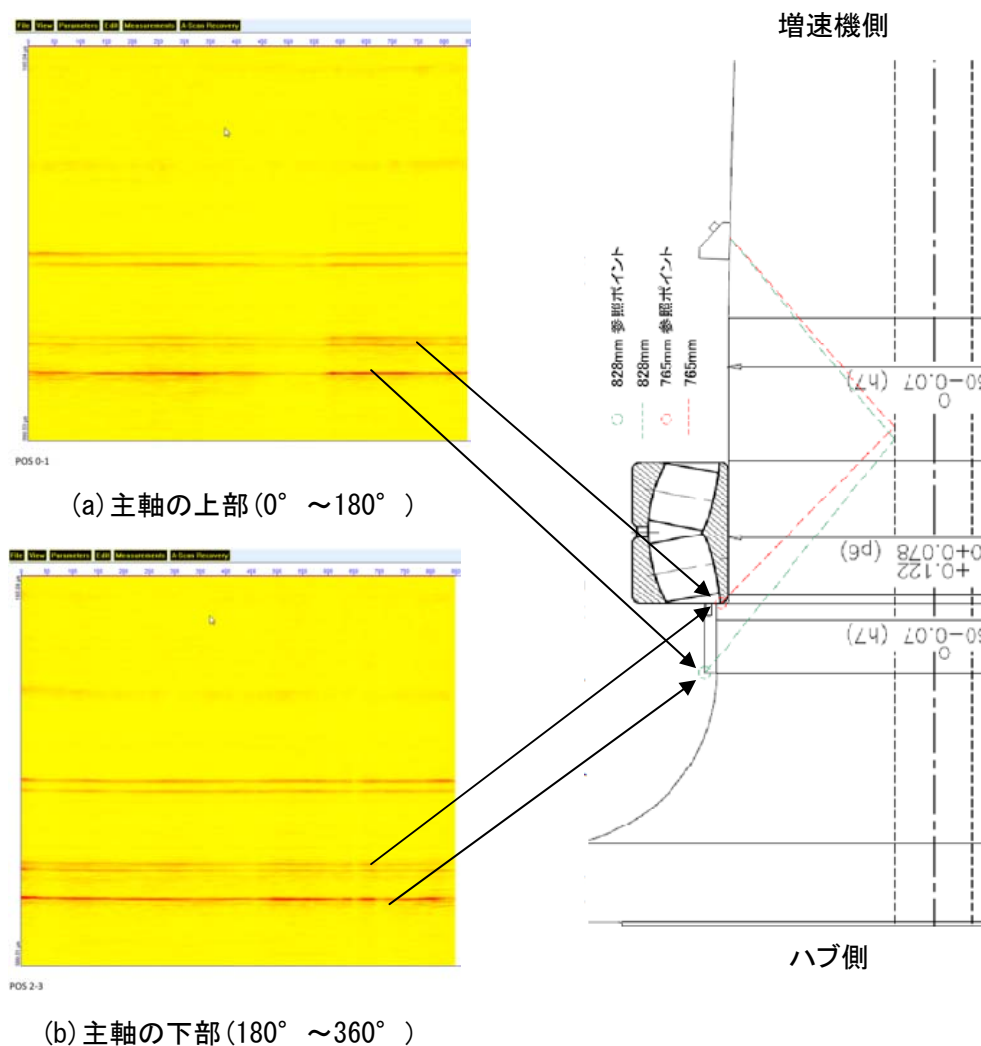


図 5-32 苫前 GHWP7 号機の超音波探傷検査結果

超音波探傷検査の結果を整理すると、表 5-7 の通りである。

表 5-7 風車メーカーによる超音波探傷検査の結果

発電所名	基数	設置者	結果	検査日
苫前GHWP	19 ^{*)}	(株)ユラスエナジー・ジャパン	良:11基 判定不能:6基 スキャン不明瞭:2基	2013. 10. 3~2013. 10. 7 および 2013. 10. 26~2013. 10. 28
遠別WP	3	(株)ユラスエナジー・ジャパン	良:3基	2013. 10. 8
浜頓別WF	3	(株)ユラスエナジー・ジャパン	良:3基	2013. 10. 9
合計	25		良:17基 判定不能:6基 スキャン不明瞭:2基	

*) 事故機の 11 号機は除く。

(3) まとめ

全 25 機の内 17 機については、損傷・亀裂を示すデータ・画像は検出されず、風車の運転に支障が無い事を確認。残りの 8 機については、鮮明な画像が採取できず、明確な判定が困難であるという結果になった。(表 5-8)

スキャン不明瞭の 2 機については、当社にて磁粉探傷検査を実施済み。

ポイント a の反射確認不能の 5 機について、風車メーカーの所見では、当面運転に支障はない。ただし、超音波探傷検査を定期的に行うことを推奨された。

ポイント b の反射確認不能の 1 機について、風車メーカーの所見では、追加調査を実施することを推奨された。

従って、検査を行った風車メーカーの推奨に則り、5 機の風車については、定期的な超音波探傷検査の実施、もしくは超音波探傷検査に代わる非破壊検査を実施することにより、主軸の健全性を確認することとし、残り 1 機の風車については、主軸を降架し磁粉探傷検査を実施する。

表 5-8 超音波探傷検査による判断不能な風車

風車番号	判定結果	今後の当社対応
苫前No. 1	スキャン不明瞭	磁粉探傷検査により問題がない無い事を確認済み
苫前No. 5	ポイントaの反射確認不能	定期的な超音波探傷検査又はそれに代わる非破壊検査の実施
苫前No. 6	ポイントbの反射確認不能	磁粉探傷検査を実施予定
苫前No. 14	ポイントaの反射確認不能	定期的な超音波探傷検査又はそれに代わる非破壊検査の実施
苫前No. 10	ポイントaの反射確認不能	定期的な超音波探傷検査又はそれに代わる非破壊検査の実施
苫前No. 17	ポイントaの反射確認不能	定期的な超音波探傷検査又はそれに代わる非破壊検査の実施
苫前No. 18	ポイントaの反射確認不能	定期的な超音波探傷検査又はそれに代わる非破壊検査の実施
苫前No. 20	スキャン不明瞭	磁粉探傷検査により本件の応力集中の事象とは異なる傷を確認 今後の対応を検討中

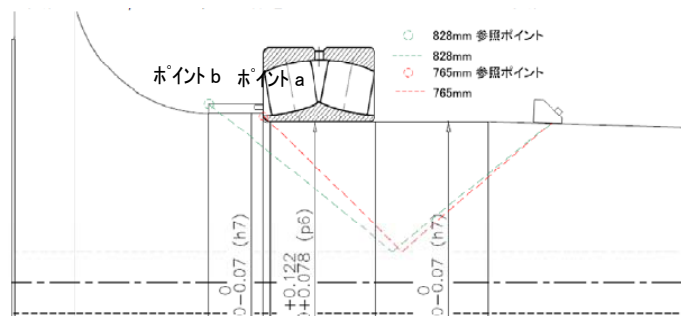


図 5-33 反射波の確認ポイント

【超音波探傷検査の判定基準】

- ・ポイントaの反射波有り : 主軸の表面から深さ 5mm 以上の亀裂はない
- ・ポイントaの反射波無し : 主軸の表面から深さ 5mm 以上の亀裂の有無は確認不能
- ・ポイントbの反射波有り : 主軸の表面から深さ 50mm 以上の亀裂はない
- ・ポイントbの反射波無し : 主軸の表面から深さ 50mm 以上の亀裂の有無は確認不能

【風車メーカーの見解】

- ①ポイント a かつ b の反射波が確認された場合は、風車の運転再開に支障はない。
- ②ポイント b の反射波が無い場合には、追加調査を推奨する。
- ③ポイント a の反射波が無い場合でも、運転再開に支障はない。但し、定期的な亀裂進展の有無監視を推奨する。

5-5. 主軸の寸法測定、浸透探傷検査・磁粉探傷検査

同型機の状態を確認するため、ナセル上にある主軸の超音波探傷検査に加え、数機については外観目視点検、主軸の寸法測定、浸透探傷検査または磁粉探傷検査を実施した。

(1) 実施対象

過去の運転履歴を考慮し、以下の4機とした。

- ・ 浜頓別2号機（事故発生当時、A社にて軸受交換作業中）
- ・ 苫前1号機（軸受の鉄粉濃度が当社の管理値を超過）
- ・ 苫前20号機（軸受破損が発生（2007年6月）し、主軸および軸受交換後に長期間運転）
- ・ 苫前7号機（軸受破損が発生（2009年1月）し、20号機に次いで交換後に長期間運転）

(2) 実施方法

主軸を降ろして国内修理業者に持ち込み、外観目視点検、主軸の寸法測定、曲率半径R部に対する浸透探傷検査または磁粉探傷検査を実施した。寸法測定位置を図5-34に示す。

(3) 実施結果

主軸寸法は風車メーカーの原設計通りであり、浸透探傷検査や磁粉探傷検査より曲率半径R部に応力集中による亀裂・損傷は確認されなかった。結果を表5-9に示す。

(4) まとめ

4機を対象に、主軸を降ろして外観目視点検、主軸の寸法測定、浸透探傷検査または磁粉探傷検査を実施した結果、寸法は風車メーカー原設計と一致しており、曲率半径R部には応力集中による亀裂・損傷を示唆する様相は確認されなかった。ただし、苫前20号機については、磁粉探傷検査の結果、曲率半径R部に軸方向に長さ12mm程度の傷が確認された。

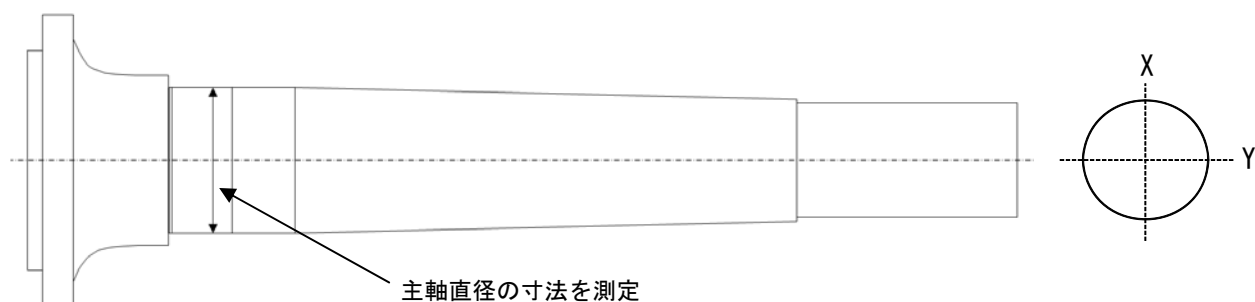
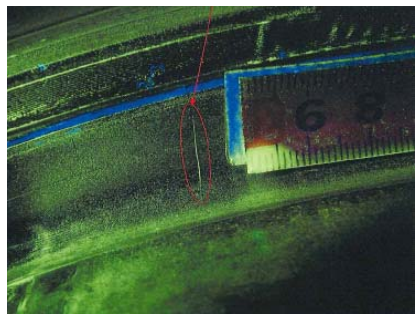


図 5-34 主軸の寸法測定箇所

表 5-9 主軸の寸法測定、浸透探傷検査・磁粉探傷検査の結果

風車番号	非破壊検査写真	非破壊検査結果	主軸外形
浜頓別 No. 2		合格 (浸透探傷試験)	$\phi 530-0.05 \sim +0.05\text{mm}$
苫前 No. 1		合格 (磁粉探傷試験)	X : $\phi 530+0.120\text{mm}$ Y : $\phi 530+0.120\text{mm}$
苫前 No. 20		曲率半径R部の軸方向に 長さ12mm程度の傷あり (磁粉探傷試験)	X : $\phi 530+0.090\text{mm}$ Y : $\phi 530+0.090\text{mm}$
苫前 No. 7		合格 (磁粉探傷試験)	X : $\phi 530+0.120\text{mm}$ Y : $\phi 530+0.120\text{mm}$

5-6. 事故原因のまとめ

(1) 事故進展フロー

以上の調査結果より、事故進展フローは表 5-10 のように推定できる。

表 5-10 事故進展フロー

2011年12月	苫前7号機にて、軸受焼付きが発生
↓	
2012年3月～4月	苫前7号機から降ろした主軸を、国内修理業社(A社)に持ち込み修理。この際、当社の指示が不十分であり、風車メーカー原設計と異なる修理（主軸の径を20mm程度旋削、主軸段付部の曲率半径R加工が無く、旋削に伴う加工傷が付いた）を実施。軸受についても新しい物へ交換。修理後は予備主軸として保管。
↓	
2012年6月	苫前11号機に軸受破損が発生し、予備主軸（上記修理品）に交換。
↓	
2012年6月1日 ～2013年9月4日	主軸には上記修理の影響により、主軸段付き部に応力が集中し、疲労亀裂が徐々に進展。なお、軸受の鉄粉濃度は管理値以内であった。
↓	
2013年9月5日	主軸が破断し、ロータハブが落下する事故が発生

FTA (Fault Tree Analysis) を行い、その結果を踏まえて主軸破断の事故原因を整理すると、「設備不備－施工不完全」と分類できる（表 5-11）。

表 5-11 事故の原因分類表

原因		評価	根拠
大分類	小分類		
設備不備	製作不完全	×	軸受破損の経緯がある主軸の調査結果（寸法測定、超音波探傷検査、浸透探傷検査または磁粉探傷検査）より、異常は無かったことから、風車メーカーの製作不完全では無い。
	施工不完全	◎	主軸を国内修理業者（A社）で修理する際、当社の指示が不十分であり、風車メーカー原設計と異なる修理（主軸の径を20mm程度旋削、主軸段付部の曲率半径R加工が無く、旋削に伴う加工傷が付いた）が行われ、主軸段付部に応力集中し、主軸破断に至ったことが判明。
保守不備	保守不完全	○	主軸破断の直接的原因ではなかったが、主軸の焼付きが主軸破断の発端となった。
	自然劣化	×	軸受破損の経緯がある主軸の調査結果より、異常は無かったことから、自然劣化ではない。
	過負荷	×	過負荷運転は行っていない。
自然現象	風雨、氷雪、雷、地震、水害、山崩れ、雪崩、塩、ちり、ガス	×	事故発生時の天候は曇り、風速は10m/s程度であったため、自然現象では無い。
故意・過失	作業者の過失	×	作業者の過失は無い。
	公衆の故意・過失	×	公衆の故意・過失は無い。
	無断伐木	×	風車近隣に樹木は無い。
	火災	×	火災は無い。
他物接触	樹木接触、鳥獣接触、その他の他物接触	×	左記に接触により、主軸破断に至るとは考えられない。
腐しよく	電気腐しよく、化学腐しよく	×	主軸破断面には、ビーチマークやステップが確認されたことから、加工傷を起因した金属疲労が破断の原因であり、腐しよくの影響は無い。
震動	震動	×	近隣で工事は実施されておらず、重機の震動による影響は無い。
他事故波及	自社、他社	×	事故発生時、自社または他社の事故波及は無かった。
燃料不良	燃料不良	×	該当しない。
その他	その他	×	該当しない。
不明	不明	×	該当しない。

6. 再発防止対策

事故の再発防止を図るため、「事故原因に対する防止対策」と「当社の取組」を下記の通り実施する。

6-1. 事故原因に対する防止対策

(1) 主軸の適切な修理

①重要部位（ブレード、ハブ本体、主軸、タワー）に関する修理方針の徹底

重要部位に対して、風車メーカーの事前確認が取得できない場合、原設計の変更となる修理は行わない旨を記載した技術標準書を2013年12月末迄に策定する。ただし、当該技術標準書作成までの経過措置として、直ちに社内通達を発出し、周知徹底する。

②重要部位に関する修理部品使用方針の徹底

重要部位を修理する場合、原則として風車メーカーの純正品を使用する旨を記載した技術標準書を2013年12月末迄に策定する。ただし、当該技術標準書作成までの経過措置として、直ちに社内通達を発出し、周知徹底する。

③主要設備（ブレード、ハブ本体、主軸、タワー、増速機、発電機、変圧器、基礎）発注時の仕様書作成、社内組織の見直し、検収の徹底

主要設備（修理を含む）の発注をする際は、当社要求仕様（検収項目を含む）を明確にした仕様書を作成し、新たに設ける購買担当組織にて発注先の適正審査や発注仕様書の内容を確認する。また、仕様書に従って検収（修理後の健全性の確認・検証）を行う。（購買担当組織は2013年12月末迄に設ける。仕様書作成と購買担当組織による審査のルール化について、直ちに社内通達を発出し、周知徹底する。）

(2) 主軸軸受の焼付き防止

軸受の焼付きは本件事故の直接原因ではないが、軸受の重度の損傷であるため、再発防止を図るべく以下を実施する。

①主軸軸受へのセンサー等の設置

- ・主軸軸受に温度センサーが無い風車を対象に、2013年12月末を目途に温度センサーを設置し、設定温度を超えた場合には風車を自動停止させる対策を実施する。温度センサーについてはPT100、バイメタル、サーミスタ等を選定中であり、主軸軸受のハウジングに設置することで詳細を検討中。
- ・温度センサーに加えて、実施可能な対策についても検討する。

②主軸軸受管理手順の見直し

現在主軸軸受の管理手順は保安規程の下位文書である運転保守要領に記載されている。今回は保安規程を改定し、運転保守要領の位置づけを明確に記載する。改訂は2013年12月末迄に実施する。2014年3月末を目途に現行の管理手順をより実効的な手順に見直す（主軸の非破壊検査の実施等）。

6-2. 当社の取組

上記対策に加えて、設備保全の更なる強化を目的として、以下を実施する。

①設備状態の見える化

主要設備について、設備状態を見える化するためのカルテ（主要設備の諸元や保守点検記録等を全社大で一元管理するためのシステムを新たに構築し、保守点検データを時系列でグラフ化して劣化傾向の把握に役立てる）を作成し、設備のリスク評価を行い、的確な設備保全ならびに事故の防止に繋げる。2013 年 12 月末を目途に、システムを構築する。

②従業員の技術・技能向上

従業員の技術・技能の更なるレベルアップを図り、設備保全レベルの向上に繋げる。

7. 今後の対応について

今後は、再発防止対策を早急を実施していくものとする。事故機以外の同型風車については、安全を確認した上で順次運転の再開を目指すものとする。あわせて、発電所の長期にわたる安全且つ安定した運転を確保するために、運転保守に係る社内ルール・管理体制の随時見直しを行い、改善を重ねていく所存である。

以 上

苫前グリーンヒルウインドパーク 風車破損事故調査委員会 名簿

委員長：

中村 成人 株式会社ユーラスエナジージャパン 代表取締役社長

委員：

勝呂 幸男 日本風力エネルギー学会 会長

石原 孟 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授

小川 武史 青山学院大学 理工学部 機械創造工学科 教授

オブザーバー：

山際 謙太 独立行政法人 労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ
主任研究員

手塚 英志 東京電力株式会社 技術統括部 技術開発センター
材料評価技術グループマネージャー

青木 俊篤 シーメンス・ジャパン株式会社 エナジー事業本部 風力発電部 部長

福山 憲明 シーメンス・ジャパン株式会社 エナジー事業本部 エナジーサービス部

清水 正己 株式会社ユーラスエナジーホールディングス 代表取締役社長

土屋 昌二 株式会社ユーラスエナジーホールディングス 取締役

苫前グリーンヒルウインドパーク 風車破損事故調査委員会 開催実績

第1回委員会

- 日 時 : 2013 年 9 月 20 日 17:00~19:30
- 場 所 : (株)ユーラスエナジージャパン 本社
- 議 題 : ・ 設備概要、事故概要、事故発生時の気象・運転状況の報告・審議
・ 事故状況、履歴の報告・審議
・ 事故原因究明方針の報告・審議

第2回委員会

- 日 時 : 2013 年 9 月 27 日 18:00~20:30
- 場 所 : (株)ユーラスエナジージャパン 本社
- 議 題 : ・ 第1回事故調査委員会の議事録の審議
・ 風車メーカーへ要請の情報提供状況の報告
・ 第1回事故調査委員会資料の追記・修正箇所の報告・審議

第3回委員会

- 日 時 : 2013 年 10 月 18 日 17:00~19:00
- 場 所 : (株)ユーラスエナジージャパン 本社
- 議 題 : ・ 第2回事故調査委員会の議事録の審議
・ 中間報告提出後の進捗の報告と質疑応答
①ハブ側主軸破断面の顕微鏡検査の結果報告
②事故機と同型機全 25 機の超音波探傷検査の結果報告
・ 今後の作業予定
①ナセル側主軸破断面の調査
②主軸破断事故のメカニズム検証のための定量解析
・ 再発防止策に関する現時点での素案の報告・審議

第4回委員会

- 日 時 : 2013 年 11 月 1 日 17:00~20:30
- 場 所 : (株)ユーラスエナジージャパン 本社
- 議 題 : ・ 第3回事故調査委員会の議事録の審議
・ 第3回事故調査委員会後の進捗の報告と質疑応答
①主軸破断面の顕微鏡検査の結果報告
②事故機と同型機全 25 機の超音波探傷検査の結果報告
・ 最終報告(案)の報告・審議