

# ピッチベアリングに発生したクラックの原因調査進捗報告

## はじめに

J82で発見されたピッチベアリングのクラックは、海外P社及び国内R両社のベアリングから発見されている。前回までに報告したように、海外P社製のベアリングでは挿入栓口にクラックが発生しており、国内R社製では主にボルト孔より発生していた。本報告では、この2種類のクラックについて発生原因を調査検討した結果とともに、対策案について報告する。

## 1. クラックの発生状況

図1に示す通り、ピッチベアリングのオリエンテーションを、図1におけるハブ左側(風車上部)を0°として時計回りに風上側を90°と定義する。クラックの発生している挿入栓口は180°方向に配置されており、また、ボルト穴に発生したクラックは150°付近に発生している。P社製ピッチベアリングは全てピン穴および玉挿入栓口近傍にクラックが発生しており、R社製ピッチベアリングは、クラックの発見された6個のベアリングの内、ボルト孔部に発生が確認されているものが5個、P社製と同様に挿入栓口に発生しているものが1個発見されている。表1および表2に全サイトにおけるクラックの発生状況一覧を示す。

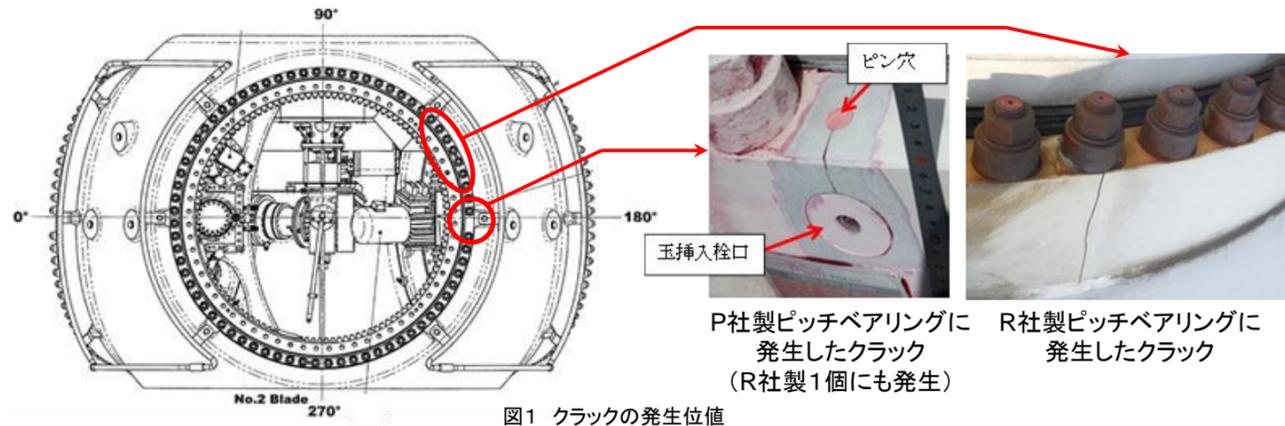


図1 クラックの発生位置

表1 P社製ピッチベアリングにおけるクラックの発生状況

サイト名	基数	1軸 確認結果 ○or×	クラックの 進展状況	2軸 確認結果 ○or×	クラックの 進展状況	3軸 確認結果 ○or×	クラックの 進展状況
PA	1	○		×	A	×	C
PB	1	○		○		×	D
PC	4	×	A	○		×	B
		○		×	B	○	
		×	B	○		○	
		×	B	○		○	
PD	6	○	A	○		○	
		×	B	○		○	
		×	B	○		○	
		×	B	○		○	
		×	B	○		○	
		×	B	○		○	
PE	2	○	B	○		○	
		○		×	B	○	

表2 R社製ピッチベアリングにおけるクラックの発生状況

サイト名	基数	1軸 確認結果 ○or×	クラックの 進展状況	2軸 確認結果 ○or×	クラックの 進展状況	3軸 確認結果 ○or×	クラックの 進展状況
RA	1	○		×	Y	○	
RB	1	○		○		×	X
RC	2	○		×	B	○	
		×	Y	×	Y	○	
RD	1	○		○		×	Y

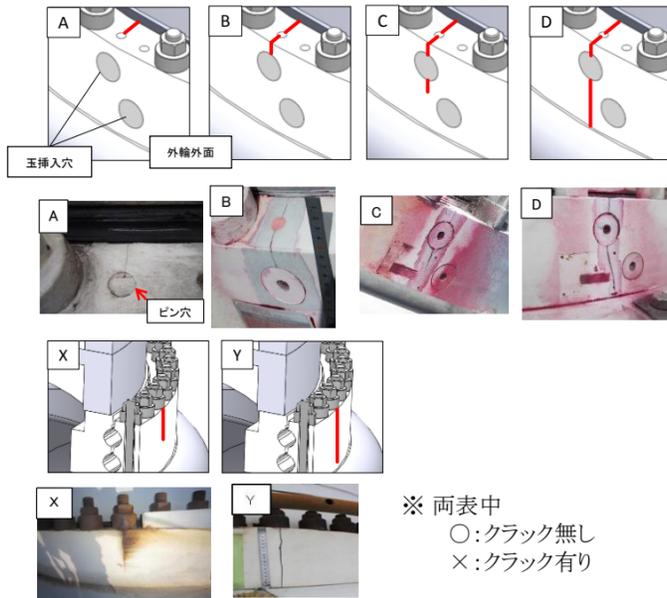


図3 クラックの状態

## 2. 調査結果

### 2.1 材料調査結果

両社製共に材料不良は確認されなかった。しかし、P社製ベアリングの材料は規格内ではあるが材料の強度および硬度にばらつきが多いことが確認された。

表3 P社製及びR社製ピッチベアリングの材料調査結果

項目	P社製	R社製
材質	42CrMo4 (SCM440相当)	SCM445
強度	YS:666~776MPa, TS:885~960MPa	YS:757~765MPa, TS:924~930MPa
硬さ	HV249~316	HV280~300
レース面	高周波焼入れ 表面硬さ:HV600, 硬化深度:約6mm	高周波焼入れ 表面硬さ:HV710, 硬化深度:約6mm

### 2.2 損傷品の分解調査結果

#### 2.2.1 P社製ベアリングの分解調査結果

材料不良は確認されなかったことから、挿入栓口、ピン穴の構造的な違いを比較してクラック発生の要因をFTA分析により想定した(図4)。その結果、形状による応力集中と荷重条件が原因であることが推察された。

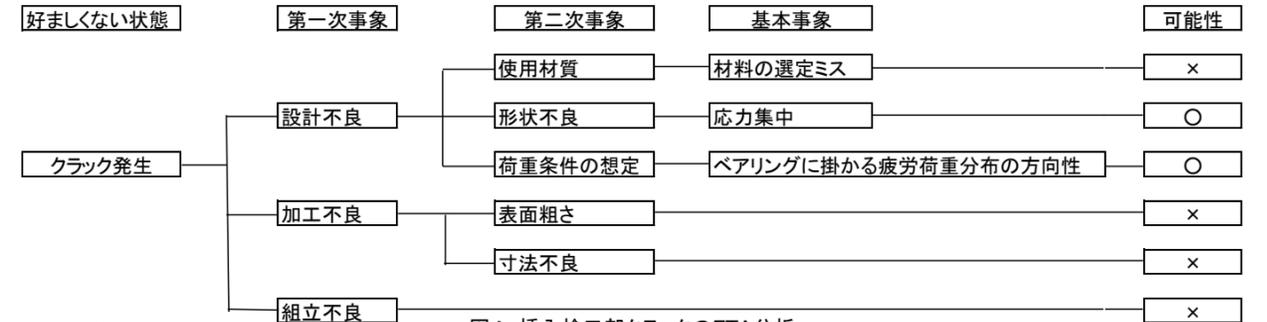


図4 挿入栓口部クラックのFTA分析

#### 要因①: 応力集中

挿入栓口にクラックが発生したP社製ベアリングの破面調査を実施した(図5)。クラックは、①,②が起点となって発生していることが判明した。クラックの進展は、実機における観察結果より①→②の順に進んだと推定できる。起点には介在物、欠陥、マイクロ組織の異常は確認されなかったこと、また、FEM解析(図6)においても起点部である孔交差部に7倍~10倍の応力集中が発生していることが確認されたことから、形状による応力集中がクラック発生の一因であると結論付けた。

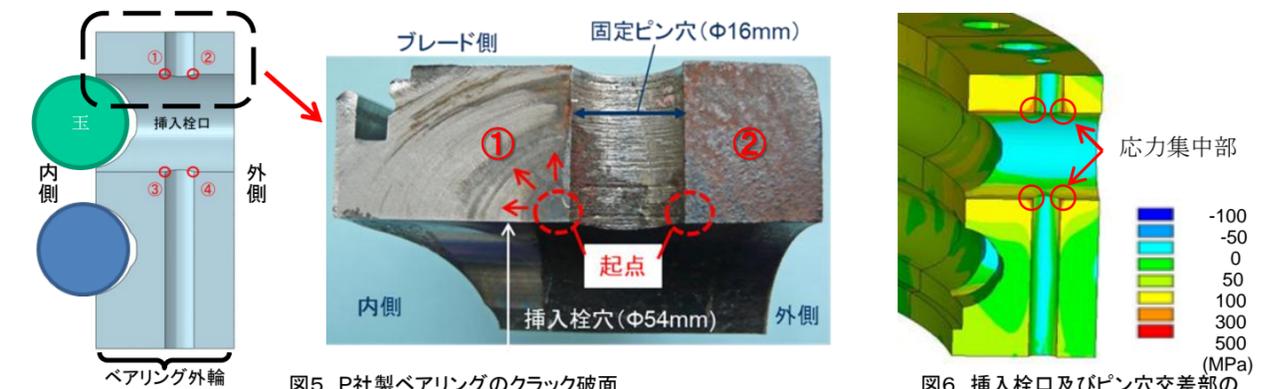


図5 P社製ベアリングのクラック破面

図6 挿入栓口及びピン穴交差部の応力解析結果

#### 要因②: 荷重分布

現在の挿入栓口位置(180°)は、極値荷重条件時に作用する荷重が低い位置として選定しているが、発生したクラックが疲労破面であったことから、ベアリング周方向各位置における疲労照査を実施した。図7にベアリング周方向位置による等価疲労荷重分布を示す。図中の等価疲労荷重は、実機において測定された風況と、Class IIAの風況条件を使用し、疲労照査に必要な設計荷重条件(DLC)を用いて風車動解析を実施して得られた結果より、**現在挿入栓口が配置されている位置(180°)は、疲労荷重が大きい位置であることが判明した。**

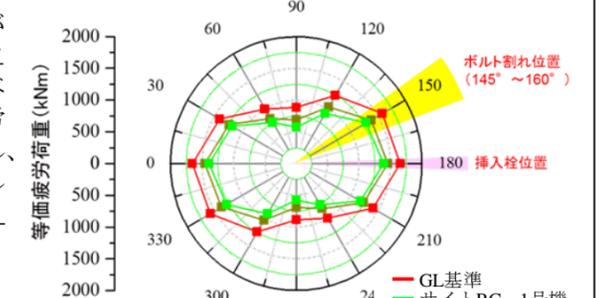


図7 解析による等価疲労荷重分布

#### 要因①②に対する対策:

挿入栓口のクラックはP社製ベアリングに集中していることから、P社、R社両社製ベアリングを比較した(表4)。分解調査により、R社製ベアリングは挿入栓口位置に応力緩和のための逃がし加工(図8)が施されていることが確認され、これにより両社製ベアリングの挿入栓口のクラック発生頻度に差が生じたと考えられる。以上の検討結果より挿入栓口部のクラックへの対策を以下に示す。

- 応力を低減するため、逃がし加工を施したベアリングを使用する。
- 疲労荷重及び極値荷重共に低い位置を選定して挿入栓を配置する。

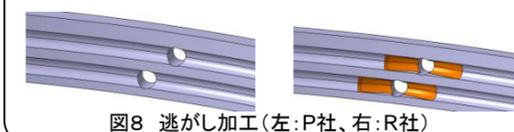


図8 逃がし加工(左:P社、右:R社)

表4 挿入栓口構造の比較

製造メーカー	割れ基数	P社製とR社製の共通の要因		P社製とR社製の差異		
		挿入栓口と固定ピン穴交差部の応力集中	挿入栓配置位置	レース面の逃がし加工	固定ピン	外輪材の疲労強度
R社	1	挿入栓口:φ60mm 固定ピン孔:φ16mm	疲労に対して、曲げモーメントが最も大きい位置	あり	中実ピン	P社製外輪材は、強度、硬さのばらつきが大きい
P社	17	挿入栓口:φ54mm 固定ピン孔:φ16mm		なし(不十分)	中空ピン	P社製は疲労強度にもばらつきがある可能性
影響		7~10倍の応力集中	最適位置に比較して2倍以上の応力が発生	逃がし加工により応力は約7%減少	応力は中実ピンが約4%小さい	

# ピッチベアリングに発生したクラックの原因調査進捗報告

## 2. 調査結果

### 2.2.2 R社製ベアリングの分解調査結果

P社製ベアリングと同様に材質不良は確認されなかったことから、図9に示すFTA分析により要因を抽出して原因の特定を検討した。その結果、形状による強度不足と応力の分布が原因であることが推察された。

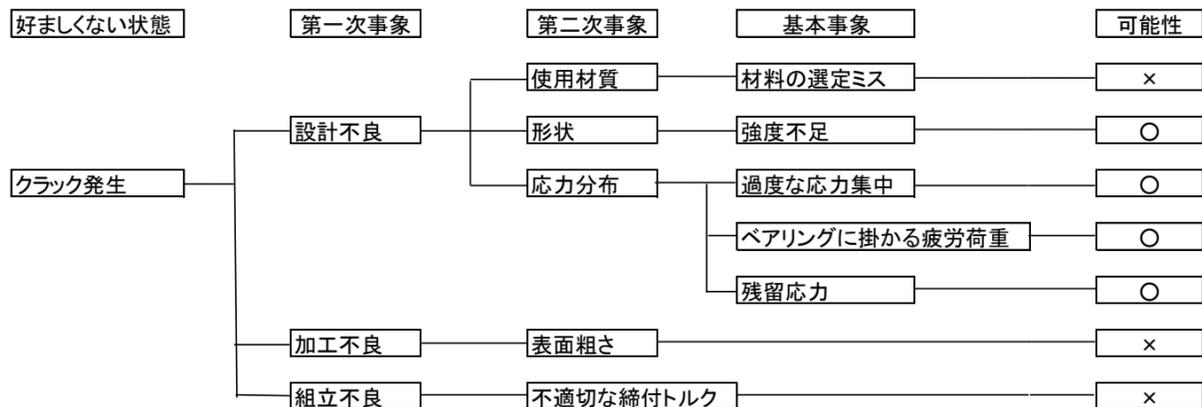


図9 ボルト孔部クラックのFTA分析

#### 破面調査結果:

ボルト孔部にクラックが発生したR社製ベアリングの破面調査を実施した(図10)。クラックは外輪を輪切り状に完全に貫通しており、ボルト孔内面のブレード側端面より約30mm~40mm位置から発生し進展していることが確認された。クラック起点部の拡大図(図11)からは、半楕円弧状のビーチマークが明瞭に観察された。したがって、このクラックの発生・進展は疲労に起因するものと推定される。また、内面側に発生したクラックでは、高周波焼入れ層と母相の境界近傍でビーチマークが半楕円弧から大きく湾曲しているのが認められた。これは、高周波焼入れによる残留応力の存在によりクラックの進展速度が大きく変化したためと推定される。

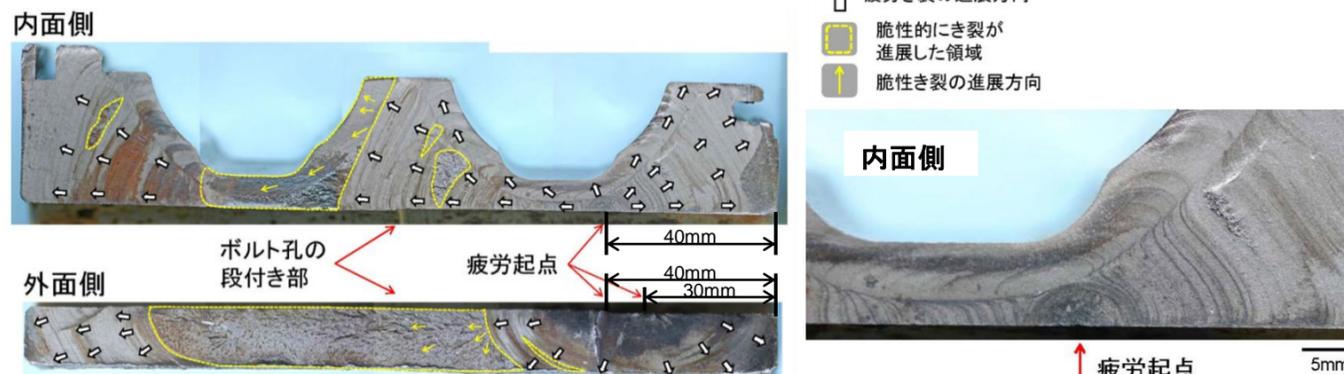


図10 R社製ベアリングのボルト孔部クラックの破面及びクラック進展の模式図

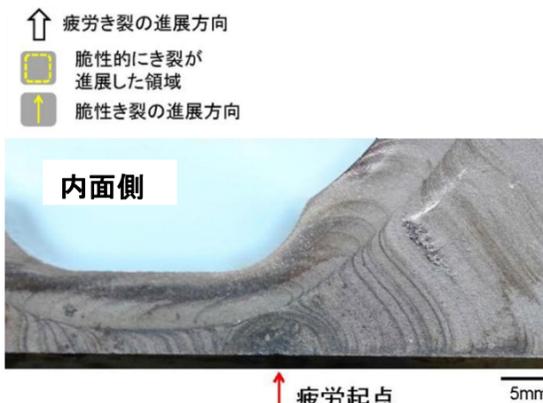


図11 クラック起点部拡大図

#### 要因①: 形状による強度不足

高周波焼入れを考慮していない場合のFEMによる応力解析の結果(図12)より、ボルト孔部に強度不足が懸念される部位は確認されず、クラックの発生の原因となる結果は得られていない。

#### 要因②: 応力分布

図12より、クラック起点部は応力の高い部位に一致しているが、その応力振幅は挿入栓穴部に比較して1/2以下であり、クラックの要因となる過度の応力集中は確認されなかった。現在、他の要因の調査を継続しており、高周波焼入れ時に発生した残留応力の影響を検討中である(表5)。今後、未使用品ベアリングの残留応力測定を実施し、FEM解析結果と共にクラック発生原因を特定する予定である。

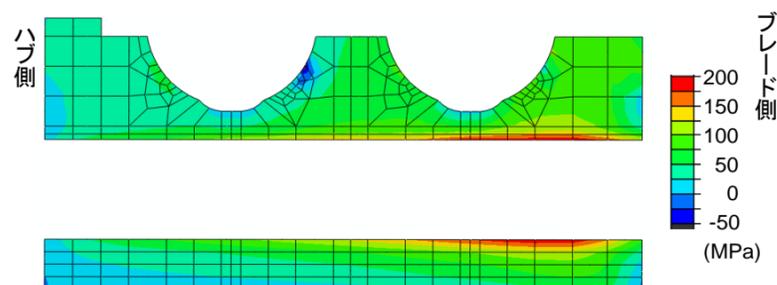


図12 FEMによる応力解析結果

表5 ボルト孔構造の比較

製造メーカー	割れ基数	P社製とR社製の差異								稼働時間
		ハブ形状	ボルト締結力 (kN)	ボルト孔				挿入栓孔割れ存在によるボルト孔応力の低下		
				面粗度 Rz	段差	内径	腐食 (ピット)		残留応力	
R社	4	Class III	310	240μm	深さ中央に0.5mmの段差	起点部φ31mm	あり	起点部には大きな引張残留応力の存在が予想される	ボルト穴応力の低下は無し	3年11ヶ月以上
	1	Class II	283							
P社	0	Class II	283	230μm	段差なし	起点部φ30mm	未調査			3年11ヶ月以下
影響		無し (応力はクラスIIが大)	無し	無し	無し	約3%応力が増加	無し (起点では無い)	平均応力としての効果が大きい	無し	定量的な立証が困難

#### 要因①②に対する対策:

現在、クラック発生の対策として、クラックの発生起点となっている高応力部における応力緩和措置のため、ベアリングの外輪外径寸法の変更(外輪の肉厚の増加)とベアリング高さの変更を検討中である。

## 3. まとめ

### 3.1 風車の暫定再稼働について

- 図1に示すクラックの状態の中から、ピン穴までのクラック(Aの状態)に対して、締結ボルトに掛かる応力を確認の上、安全性に影響は無いことが確認されたことから、クラックの進展を管理し風車を再稼働させる。クラックの進展の管理は、クラックゲージをベアリングの図13に示す位置に取り付け、図14に示すクラックの進展を常時モニタリングできるシステムを構築した。クラックの進展が確認された時点で、風車を保安停止する。更に、点検マニュアルを作成し、定期的な目視確認も併せて実施する。
- 挿入栓口に発生したクラックの原因とその対策が明らかとなったことから、ベアリング交換に際し、オリエンテーションを変更してベアリングの取り付けを行う。
- 応力緩和措置のために寸法変更した改良ベアリングを制作、順次交換を行う。

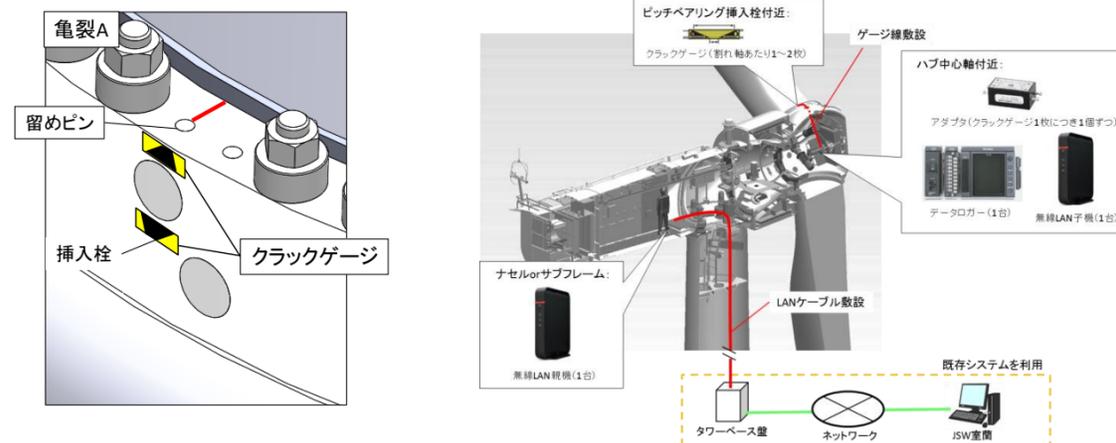


図14 クラック進展のモニタリングシステム概要

### 3.2 原因究明と対策について

次のような原因究明と対策で臨む。

クラック発生部位	ピン穴および玉挿入栓口近傍	ボルト穴部
原因究明	形状による応力集中(結論付けた)	焼き入れを考慮した応力解析と残留応力の測定を行う。
対策	逃がし加工実施と挿入栓位置の変更実施(決定)	ベアリングの寸法変更を検討中。