

## 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

### 1. はじめに

第3回までの構造強度WGで報告したように、弊社製風力発電機J82のピッチベアリング外輪に発生したクラックに関して、その原因究明のための調査を進めてきた。その結果、クラックの発生原因がほぼ特定できたので、調査結果、発生原因、及び対策案を報告する。

### 2. クラックの発生状況

図1に示すように、ピッチベアリングの周方向オリエンテーションを、同図左側(風車上部)を0°として時計回りに定義する。クラックは、180°方向に配置されている挿入栓穴、及び140°~150°方向付近のボルト穴に発生した。ピッチベアリングは、その製造会社がP社とR社の二種類あり、P社製ベアリングではその19体において挿入栓穴からクラックが発生した。また、R社製ベアリングでは、挿入栓穴にクラックが発生したものが1体、ボルト穴に発生したものが5体である。

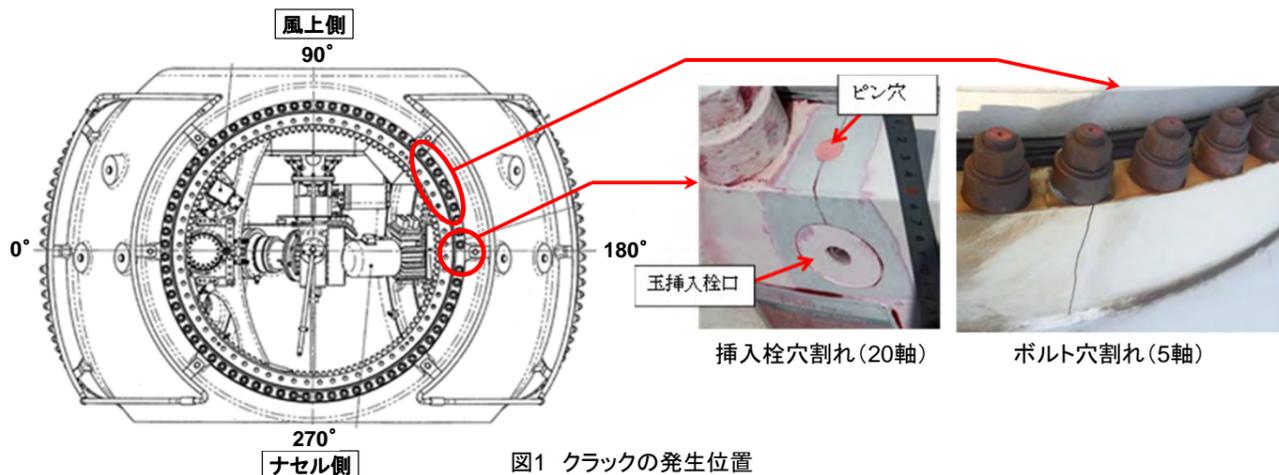


図1 クラックの発生位置

### 3. 外輪材料の調査結果

P社製及びR社製ピッチベアリング外輪の材質、強度、及びレース面の性状を表1に示す。P社製外輪の材質は欧州の規格(EN 10083-3)に規定される42CrMo4鋼であり、引張試験より得られた実績値は、引張強さの上限を除き規格値を満足した。R社製外輪の材質はJIS G 4052に規定されるSCM445H鋼であるが、JISでは強度が規定されていないため、R社では設計に際して社内基準値を設定し強度を管理している。引張試験による実績値は社内基準値を満足した。したがって、P社製とR社製ともに外輪材料の強度には問題はなく、それがクラック発生の原因ではないと判断される。

また、レース面については、高周波焼入れ後の焼戻しの実施の有無が両社の大きな違いであり、通常行われる低温での焼戻し熱処理がR社製外輪では行われていないことが判明した。レース面の性状については、R社の硬さがP社に比較して若干大きい、両社に大きな差異はなく、GLガイドライン2003に規定される硬さの最低値を満足した。

表1 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(適用規格)		42CrMo4(EN 10083-3, 60mm<調質板厚≤100mm)	SCM445H(JIS G 4052)
強度	規格値	耐力: 550MPa以上 引張強さ: 800~950MPa	JISには規定なし R社では以下の基準値を設定 耐力: 612MPa以上, 引張強さ: 783MPa以上
	実績値	耐力: 666~776MPa 引張強さ: 885~960MPa	耐力: 757~765MPa 引張強さ: 924~930MPa
レース面	熱処理	高周波焼入れ+焼戻し(180°Cx1h)	高周波焼入れ
	挿入栓穴部	表面硬さ: HV600 <sup>※1</sup> , 硬化深度: 約6mm	表面硬さ: HV710 <sup>※1</sup> , 硬化深度: 約6mm
	ボルト穴部	表面硬さ: HV600 <sup>※1</sup> , 硬化深度: 約7mm	表面硬さ: HV650 <sup>※1</sup> , 硬化深度: 約5mm

※1) GLガイドライン2003の規定: ロックウェルのCスケール硬さで55以上(ピッカース硬さ換算値595以上)

### 4. 挿入栓穴部のクラックに関する調査結果と発生原因

#### (1) P社製ベアリング損傷品の解体調査

挿入栓穴部にクラックが発生したP社製ベアリングを解体し破面調査を実施した。その破面写真を図2に示すが、クラックは挿入栓穴とピン穴の交差部①、②から発生し、また疲労破面の特徴であるビーチマークが観察されることから疲労による損傷であることが判明した。また、起点部には介在物や欠陥、マイクロ組織の異常などは確認されなかった。

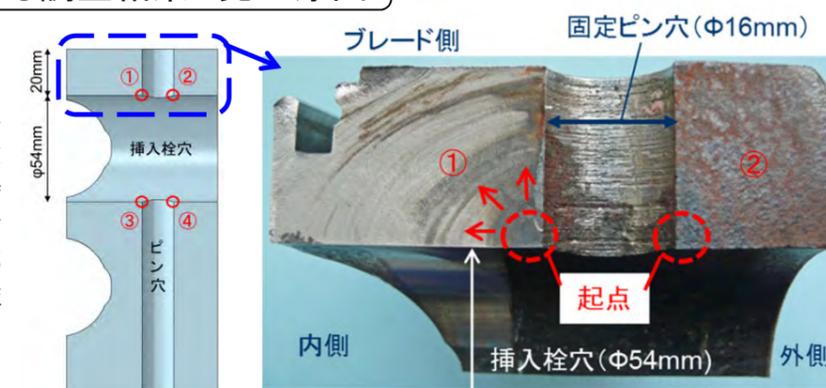


図2 P社製ベアリング損傷品の破面

#### (2) クラックの発生原因

##### a) 穴交差部の応力集中

等価疲労荷重を用いたFEMによる応力解析の結果、挿入栓穴とピン穴の交差部には7~10倍の非常に大きな応力集中が生じることが判明した。図3に挿入栓穴断面の周方向応力分布を示すが、穴交差部①、②には500MPaを超える応力が生じており、この大きな応力の繰り返しがクラック発生の原因と考えられる。

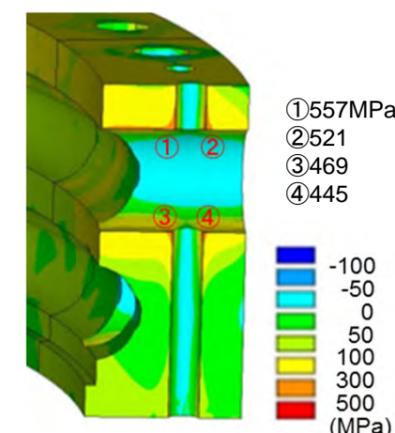


図3 挿入栓穴断面の周方向応力分布

##### b) 疲労荷重の周方向分布

現在の挿入栓穴の位置(180°)は、GLガイドライン2003に規定されている極値荷重条件時に、作用する荷重が低い位置として選定している。その際に疲労荷重に対する検討を実施していなかったため、あらためて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4にベアリングの各周方向位置における等価疲労荷重分布を示す。この等価疲労荷重は、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、疲労照査に用いられる設計荷重条件(DLC)に対して風車動解析を実施して算出したものである。その結果、現在の挿入栓穴位置(180°)は、疲労荷重が大きい位置であることが判明した。また、図3における穴交差部①の疲労寿命を疲労損傷度計算により評価した結果、寿命は約0.8年であった。したがって、挿入栓穴を疲労荷重の大きい180°位置に配置したことがクラック発生の主原因と考えられる。

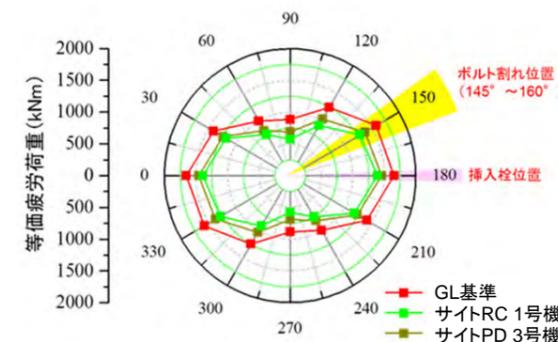


図4 等価疲労荷重の周方向分布

##### c) レース面の逃がし加工の有無

挿入栓穴部のクラックがP社製ベアリングに集中して発生していることから、P社、R社両社製ベアリングの差異を検討した。その結果を表2に示すが、両者の大きな差異は、挿入栓穴のあるソフトゾーン部レース面の逃がし加工の有無である(図5)。この逃がし加工の目的は、高周波焼入れの行われていないソフトゾーン部のレース面に鋼球が接触するのを防止することである。R社製のベアリングにのみ逃がし加工が施されていたが、規格や基準でその加工が義務付けられているわけではなく、実施はメーカー独自の判断による。この逃がし加工により挿入栓穴近傍のレース面に接触する鋼球が減少するため、穴交差部に生じる応力はP社製に比較してR社製では約7%低下する。しかし、応力の差が小さいこと、及びR社製においても挿入栓穴部のクラックが発生していることから、逃がし加工の有無がクラック発生の原因ではないと判断される。

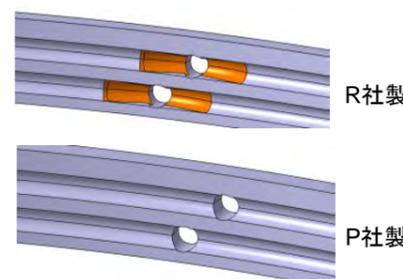


図5 逃がし加工

表2 P社製とR社製ピッチベアリング挿入栓穴部の比較

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
		挿入栓穴と固定ピン穴交差部の応力集中	挿入栓の周方向位置	
R社	1	挿入栓穴: φ60mm 固定ピン穴: φ16mm	疲労に対して、作用する曲げモーメントが最も大きい位置	あり
P社	19	挿入栓穴: φ54mm 固定ピン穴: φ16mm		なし(不十分)
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	逃がし加工により穴交差部の応力は約7%減少

## 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

### 5. ボルト穴部のクラックに関する調査結果と発生原因

#### (1) R社製ベアリング損傷品の解体調査

ボルト穴部にクラックが発生したR社製ベアリングを解体し破面調査を実施した。図6にその破面写真を示すが、クラックは外輪を輪切り状に完全に貫通しており、ボルト穴内面のブレード側端面より約30~40mm位置を起点として発生・進展していることが確認された。レース面側のクラック起点部の拡大図を図7に示すが、半楕円弧状のビーチマークが明瞭に観察されることから疲労による損傷であることが判明した。また、高周波焼入れ層と母材の境界近傍においてビーチマークが半楕円弧形状から大きく湾曲している現象が観察された。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。なお、起点部には介在物、欠陥、マイクロ組織の異常などは確認されなかった。

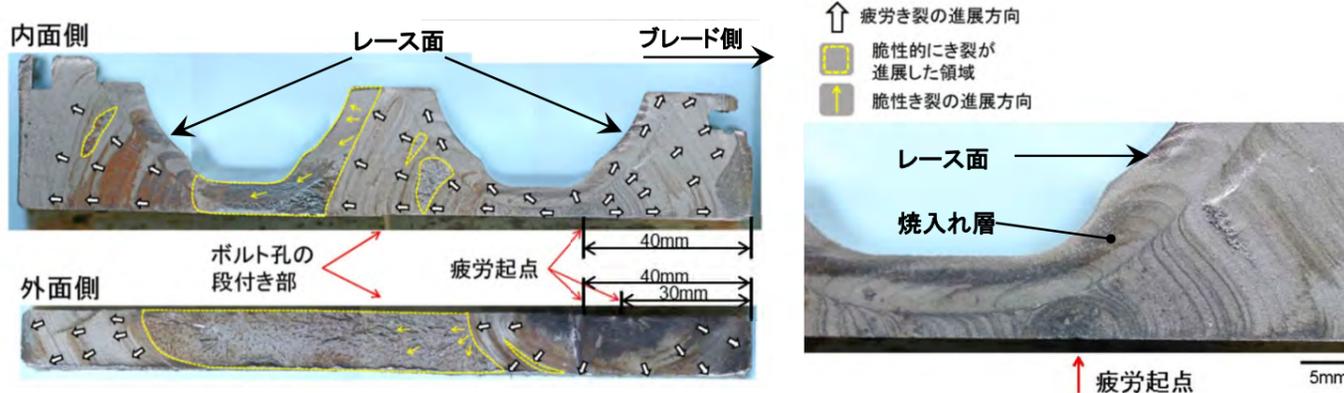


図6 R社製ベアリングのボルト穴部破面及びクラックの進展状況

図7 レース面側クラック起点部の拡大図

#### (2) ボルト穴内面の応力分布

図8にFEMによる応力解析より求めたボルト穴内面の周方向応力分布を示すが、ブレード側端面から20~40mm位置で応力が最大となり、クラックの起点位置とはほぼ一致した。しかし、応力の最大値は200MPa程度であり、挿入栓穴部の応力の1/2以下であることから、クラックの発生には他の要因があるものと推定される。

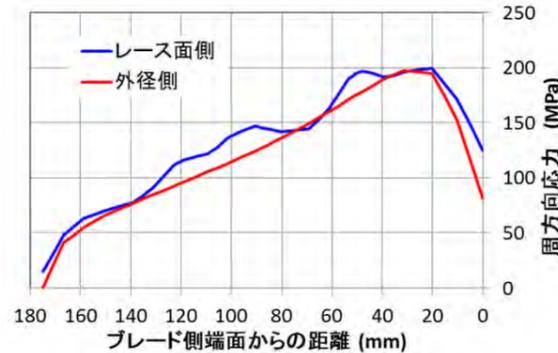


図8 ボルト穴内面の周方向応力分布

#### (3) クラックの発生原因

##### a) 高周波焼入れによる残留応力

当社が使用しているベアリングでは、鋼球の転がり面であるレース面は、その硬さと転動疲労寿命を向上させるために高周波焼入れが施されている。転動疲労寿命が向上するのは、硬さの増加に加えて圧縮残留応力がレース面に付与されるからである。しかし、ボルト穴がレース面に近接しているため、焼入れ層に存在する圧縮残留応力と釣り合うためにボルト穴の内面には大きな引張残留応力が生じることが予想される。一般に、圧縮残留応力が存在する場合には疲労強度が増加し、引張残留応力が存在する場合には疲労強度が低下する。

また、レース面の高周波焼入れ後には、焼入れ層の性状安定化と残留応力の緩和を目的に焼戻し熱処理が施されるのが一般的であるが、R社製ベアリングの外輪には焼戻しが行われていないことが確認された。一方で、ボルト穴にクラックの発生していないP社製ベアリングでは、高周波焼入れ後に180°C×1時間の条件で焼戻しが行われていることが判明した。したがって、大きな引張残留応力の存在が、R社製ベアリングにおけるボルト穴内面でのクラック発生の原因と考えられる。そこで、これらの推定を確認するために、R社製とP社製の両ベアリング外輪の残留応力を測定した。測定位置はボルト穴内面のクラック起点相当位置(ブレード側端面から40mmの深さ位置)であり、この位置に2軸のひずみゲージを貼付し、切出し法により残留応力を測定した。測定結果を表3に示すが、R社製では耐力(757MPa)に相当する周方向の引張残留応力が存在していることが明らかとなった。一方、P社製では、残留応力が存在するものの大きさはR社製に比較して小さく、500MPa以下の応力であった。

そこで、残留応力が疲労寿命に及ぼす影響を把握するために、残留応力を考慮した疲労損傷度計算によりボルト穴部の疲労寿命を評価した。ボルト穴内面に存在する残留応力と疲労寿命の関係を図9に示すが、残留応力が存在しない場合には約35年の寿命を有することが分かった。一方、残留応力が存在する場合には、残留応力が500MPaで約8年(P社製)、800MPaで約3年(R社製)の寿命となった。したがって、残留応力がボルト穴内面に存在することがクラック発生の主要原因と考えられる。

表3 ボルト穴内面の残留応力測定結果

製造メーカー	焼戻し	残留応力 (MPa)	
		周方向	軸方向
R社	なし	690	186
		636	273
		842	470
P社	あり (180°C×1h)	419	224
		461	317
FEM解析結果	なし	889	507

#### b) ボルト穴の表面粗さ

部材の表面粗さは疲労寿命に大きく影響することが知られている。表面粗さとは部材を加工した際の加工表面のミクロな凹凸を示すものであり、この凹凸が局所的な応力集中を引き起こし疲労強度を低下させる。P社製、R社製ともにボルト穴の表面粗さが管理されていないことから、ボルト穴内面の表面粗さを測定した。その結果、表面粗さは十点平均高さRzで、P社製:230μm、R社製:180μmであり、穴加工後の一般的な表面粗さ(25~50μm程度)に比較してかなり大きいことが判明した。

そこで、この表面粗さが疲労寿命に及ぼす影響を疲労損傷度計算により評価した。表面粗さRzと疲労寿命の関係を図10に示すが、残留応力が存在しない場合には現行の粗さにおいても20年以上の寿命を有することが分かった。また、表面粗さを25μmに改善することにより寿命が3倍程度向上することが分かった。

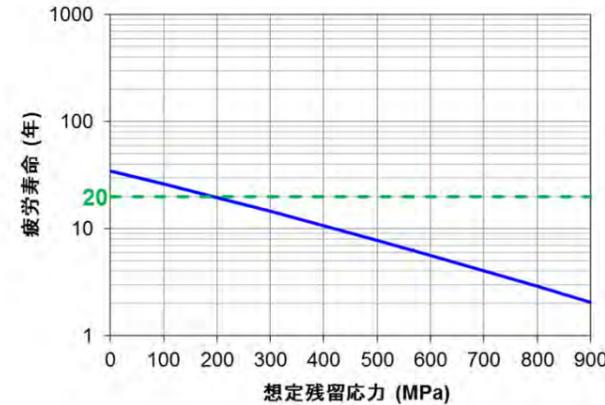


図9 ボルト穴内面の残留応力と疲労寿命の関係

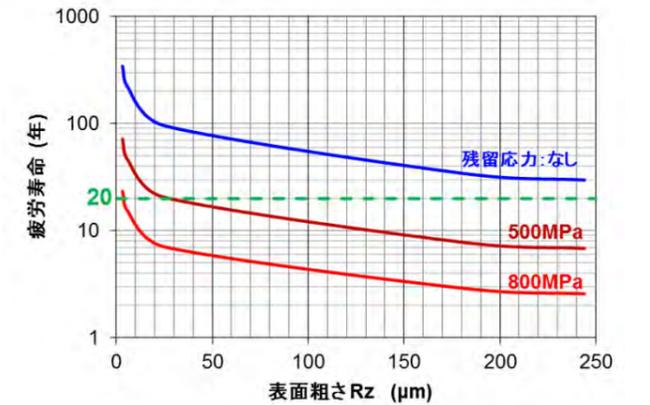


図10 ボルト穴内面の表面粗さと疲労寿命の関係

### 6. 対策案と疲労寿命評価

#### (1) 対策案

これまでの調査結果と推定原因を基に以下の対策を図る。なお、逃がし加工などの挿入栓部の構造に優れているR社製のベアリングを採用する。

##### <挿入栓穴部のクラックに対して>

a) 挿入栓穴の位置を現行の180°から240°位置へ変更し応力低減を図る(図4参照)。

##### <ボルト穴部のクラックに対して>

- b) 高周波焼入れ後に焼戻しを実施し残留応力の低減を図る。
- c) 疲労強度への影響の大きいボルト穴の表面粗さを現状のRz 180μmから25μmへ改善する。
- d) 外輪の半径方向の板厚と高さを増加し応力の低減を図る。

#### (2) 疲労寿命評価による対策案の効果の確認

対策案の効果を定量的に確認するために、疲労損傷度計算による疲労寿命評価を行った。表4に挿入栓穴部の疲労寿命評価結果を示すが、現状の0.8年に対し、挿入栓位置を変更することで約10倍の75年の寿命が得られることが確認できた。また、ボルト穴部の疲労寿命評価結果を図11及び図12に示す。図11より、現状の外輪寸法及び表面粗さの場合には残留応力がなければ20年以上の寿命を有するが、700MPa程度の残留応力が存在する場合には3~4年程度の寿命となることわかる。次に対策案のb)とc)を適用した場合には、P社製の測定結果から残留応力が500MPa以下に緩和することを考慮すると、現状の外輪寸法で約20年の寿命が、また外輪の板厚と高さをそれぞれ30mm増加した場合には約500年の寿命が得られることが分かる。したがって、構造変更の必要がない対策案b)とc)を採用し、対策案d)については最低限の寸法増加にとどめることとする。

なお、R社製外輪の焼戻し後の残留応力については現在測定中であり、結果が判明次第寸法の増加量を決定する。

表4 挿入栓穴部の疲労寿命評価結果

挿入栓位置(度)	寿命(年)
180(現状)	0.8
240	75

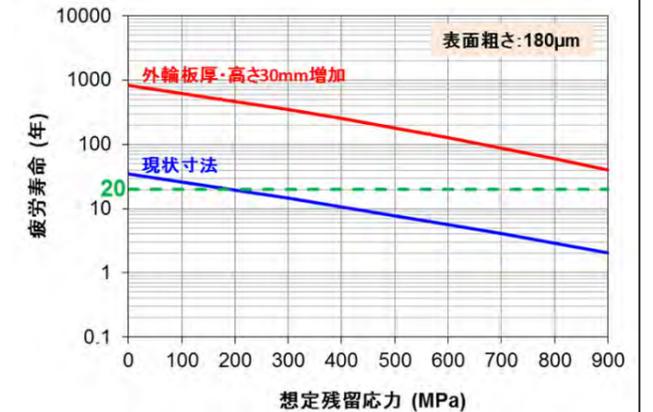


図11 ボルト穴部の疲労寿命評価結果(表面粗さ: Rz 180μm)

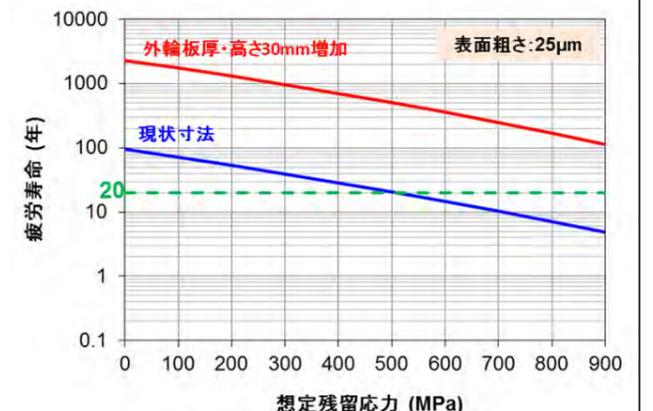


図12 ボルト穴部の疲労寿命評価結果(表面粗さ: Rz 25μm)