

(論文)

軸受鋼における介在物を起点とした転動疲労き裂発生メカニズム

Mechanism of Crack Initiation at Non-metallic Inclusion under Rolling Contact Fatigue in Bearing Steels



土田武広*1

Takehiro TSUCHIDA



田村栄一*1(工博)

Dr. Eiichi TAMURA

This study aims to clarify the fracture, caused by rolling contact fatigue and initiated from inclusions, in bearing steel. A rolling contact fatigue test was conducted in thrust mode. Then, FIB-SEM was used to observe three-dimensionally the fracture surface for the cracks initiated from non-metallic inclusions. This has clarified the overall picture for the initiation sites and propagation directions of the cracks. Subsequent stress simulation consistently-elucidates the observation result by assuming that the stress component which governs the crack initiation is tensile stress rather than shear stress.

まえがき＝近年、地球温暖化防止の観点から、各種機械に使われて摩擦損失を低減する軸受に対してはいつそうの高性能化が求められている。とくに自動車などの輸送機械用では、燃費向上のために各種ユニットの小型・軽量化が進み、必然的に軸受に対しても小型・軽量化の要求が高まっている。軸受を小型・軽量化するためには、より高い負荷を受けても要求寿命を満足する軸受鋼が必要であり、それを実現するための課題は転動疲労寿命の向上である。

軸受における転動疲労は、非金属介在物を起点とする内部起点型の疲労破壊である場合が多く、従来、酸化物系介在物を中心に介在物サイズや量を低減することによって転動疲労寿命の向上がなされてきた。しかしながら、介在物の低減には製造上の限界があり、新たな制御指針の提案が望まれている。一方、内部起点型の転動疲労に関する理解は、その観察の難しさもあって必ずしも十分ではなく、現在も地道な研究活動が続けられている^{1)~3)}。

本稿では、介在物から発生するき裂をFIB-SEMを用いて3次元的に観察するとともに、繰返し応力を付与した場合の介在物周囲のひずみの蓄積を応力シミュレーションを用いて予測し、き裂発生メカニズムについて考察した結果について述べる。

1. 転動疲労における介在物周囲のき裂発生状況の3次元観察

1.1 介在物およびき裂の3次元観察方法

従来、転動疲労における介在物からのき裂発生状況は、断面を研磨して光学顕微鏡またはSEMで観察する方法が主流であったため、介在物形状とき裂発生位置・方向の全体像を把握することは難しかった。そこでこ

では、集束イオンビーム(Focused Ion Beam, 以下FIBという)によって連続的に断面を削り出してSEM観察する工程を繰返し取得した後、多数の断面写真を画像処理によって3次元画像に再構築し、介在物とき裂の全体像を把握する方法を検討した。

供試材は、後述のプロジェクトと共通の高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)のラボ溶製材(通常よりも酸素を増量し25ppmとしたもの)である。この溶製材に存在する介在物の位置を愛知製鋼(株)においてUT(超音波顕微鏡)を用いて特定し、さらに山陽特殊製鋼(株)においてその介在物の上を転動体が転がるようにスラスト転動疲労試験が実施された後、試験片を切出した。

3次元観察では、まず、UT情報に基づいて介在物の一部が現れるまで疲労試験片の断面を湿式研磨し、介在物からき裂が発生していることを確認した後、FIB-SEMに供した。図1に3次元観察方法の概略を示す。FIB-SEMは、FEI社製Helios600を用いた。FIBによる断面観

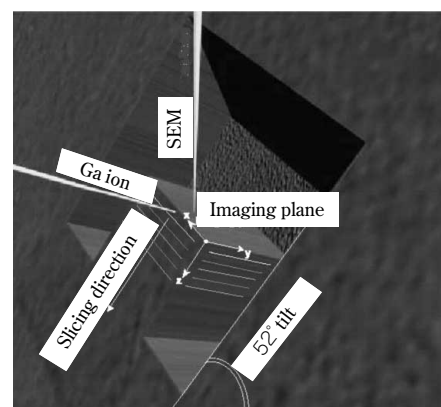


図1 FIB-SEMによる3次元観察方法の概略図
Fig. 1 Schematic of 3D structure observation by FIB-SEM

*1 技術開発本部 材料研究所

察は $0.2\mu\text{m}$ ピッチで行い、断面写真を 100~200 枚程度取得した。得られた SEM 写真について、き裂と介在物を明確に示すため、あらかじめ介在物の輪郭とき裂をマーカーでトレースし、介在物表面とき裂のみを 3次元再構築した。

1.2 介在物およびき裂の 3次元観察結果

図 2 には、転動面に垂直な断面において、介在物位置まで従来法の湿式研磨で得られた断面の光学顕微鏡写真を示す。これらのき裂は、剥離（はくり）にいたらずに停留しており、進展途中のき裂と推定される。いずれも、き裂は転動体の移動方向に対して介在物の前後に発生していることがわかるが、3次元的な全体像は明確ではない。また、これらの介在物は EDS による成分分析の結果、いずれも Al_2O_3 であった。

つぎに、試験片に最大面圧 5.3GPa で 2.79×10^6 回負荷を与えたとき、FIB-SEM で取得した断面写真の一部を図 3 に示す。断面によって介在物やき裂の形状が変化していく様子わかる。さらに、同様に取得した断面の連続写真を画像処理によって 3次元画像に再構築した。その画像の一例を図 4 に示す。最大面圧 5.3GPa で 6.1×10^6

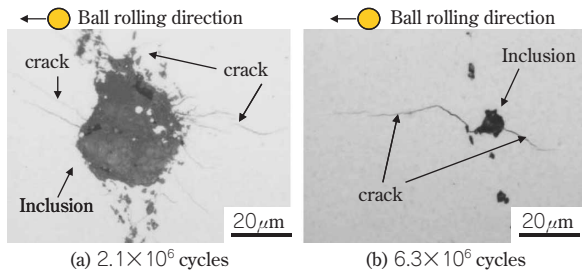


図 2 疲労試験片断面（転動面に垂直）における非金属介在物とき裂の光学顕微鏡写真（ 2.1×10^6 回負荷、 6.3×10^6 回負荷）
 Fig. 2 Examples for optical micrographs of non-metallic inclusion and cracks on conventional polished plane (vertical to rolling plane) (2.1×10^6 cycle loaded, 6.3×10^6 cycle loaded)

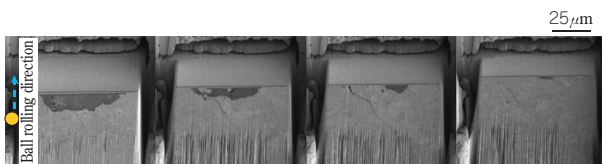


図 3 非金属介在物とき裂の FIB-SEM 連続写真の一例（ 2.79×10^6 回負荷）
 Fig. 3 Example for continuous SEM photographs of non-metallic inclusion and cracks on sectioning plane by FIB (2.79×10^6 cycle loaded)

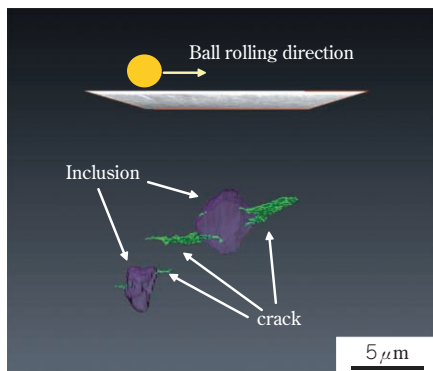


図 4 観察された介在物起点の転動疲労き裂の 3次元像の一例（ 6.3×10^6 回負荷）
 Fig. 4 3D image of crack initiation at non-metallic inclusion observed by FIB-SEM (6.3×10^6 cycle loaded)

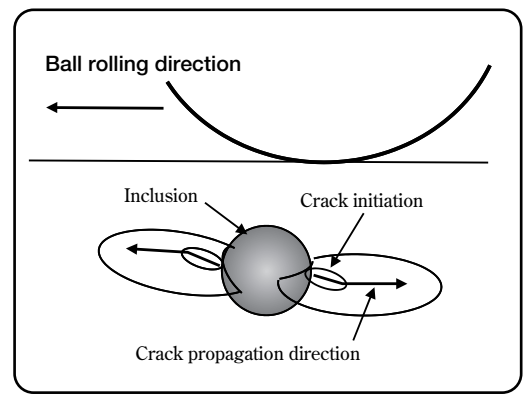


図 5 介在物を起点とした転動疲労き裂発生状況の概略図
 Fig. 5 Schematic of crack initiation at non-metallic inclusion

回負荷後に見られたき裂である。き裂は、転動体の移動方向に対して介在物の前部と後部を起点として発生し、それぞれ前方および後方に進展していることが明確である。この場合、介在物サイズが約 $4\mu\text{m}$ と小さく、 6.1×10^6 回負荷後もき裂を含めて $10\mu\text{m}$ 程度と小さいことから停留している可能性が高い。しかしながら、この初期き裂を含めた欠陥サイズや存在位置によって決まる応力拡大係数の大きさによっては、さらに進展して剥離にいたるか停留するかに分かれるものと考えられる。図 5 は典型的なき裂発生と進展の状況を示す概略図である。

2. 介在物周囲の応力シミュレーション

2.1 シミュレーションの概要

転動負荷中の介在物近傍のひずみ分布を解析することにより、き裂発生を検討した。解析は市販の弾塑性有限要素解析ソフト ABAQUS 6.5 を用いて行った。シミュレーションモデルの概略を図 6 に示す。ここでは、多種介在物形態の影響を解析できるよう、紙面に垂直方向に無限長さをもつ 2次元平面ひずみモデルとして簡便化し、転動体模擬の円柱モデル（ $\phi 9.6\text{mm}$ ）を軸受鋼模擬のモデルに変位制御で押付けた場合のひずみを調べた。

軸受鋼模擬のモデルの材質は弾完全塑性体とした（降伏応力 1,960MPa）。モデル内には介在物を模擬した弾性体をモデル化した。ここで、介在物は円形モデルを押付けた際の最大せん断応力位置に設定した。介在物モデルのヤング率は 400GPa（ Al_2O_3 模擬）および 100GPa（MnS 模擬）とした。

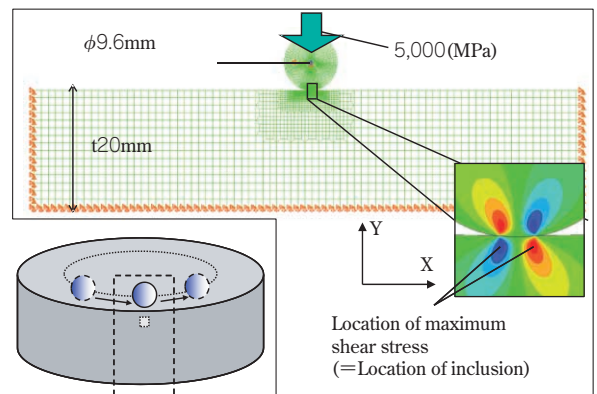


図 6 応力解析モデルの概略図
 Fig. 6 Schematic of analysis model

本稿では、転動体が軸受鋼上面を転がる挙動を模擬して解析を行ったが、解析の収束性・計算時間を考慮して、例えば図7に示すように数箇所を押付け位置を限定し、“押付け負荷(図7中①-1)→除荷(①-2)→負荷点移動(①-3)→押付け負荷…”を繰り返した。

2.2 繰返し負荷の影響

疲労現象の解析においては、繰返し負荷によるひずみの蓄積を考慮することが重要である。そこで、図7に示した転動負荷条件を3サイクル繰返し、ひずみ挙動の変化を調べた(最大面圧5,000MPa)。このとき、介在物は15×15 μm の正方形形状とし、ヤング率は100GPaとした。

計算結果の一例として、ひずみ集中部(要素A, B)のX方向(転動体移動方向)ひずみの変化を図8に示す。なお、要素A, Bの結果において、細線は除荷時の挙動も含めたひずみ変化を、太線は最大押付け時のひずみ変化を示す。1サイクル目の後半より、X方向ひずみが大きく変化するが、2サイクル目および3サイクル目はほぼ同等の挙動を繰返すことがわかる。これより、1サイクル目の解析結果でひずみ範囲を計算しても2サイクル目以降の挙動を評価できず、介在物周囲のき裂発生および進展挙動を検討するためには、2サイクル目以降の負荷サイクルに対して評価を行う必要があることがわかる。な

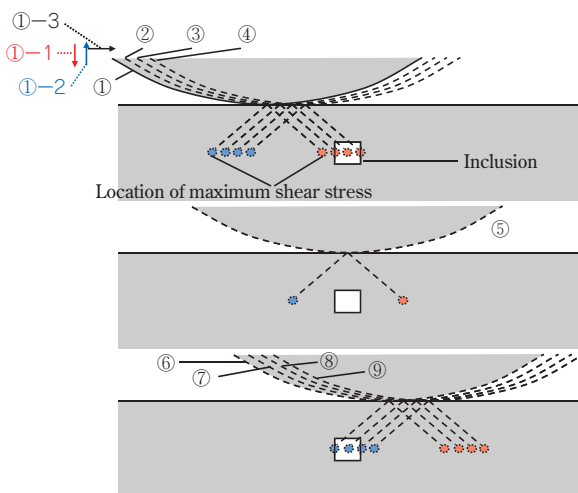


図7 転動疲労の解析条件
Fig. 7 Analysis conditions for rolling contact loading

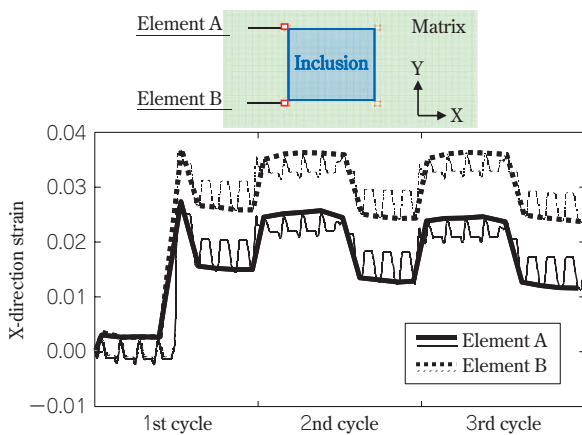


図8 介在物周囲のひずみ変化挙動
Fig. 8 Strain behavior near inclusion on 3 cycles of rolling contact loading

お、この傾向は他のひずみ成分および他の介在物形態に対するシミュレーションにおいても同様に見られた。この解析結果は、1サイクル目には、介在物の周囲に2サイクル目以降により大きな塑性ひずみが導入されることを示している。しかしながら、疲労き裂発生にはその後の安定した繰返しひずみの影響が大きいと考え、き裂発生に関する考察は繰返し負荷2回目のひずみを用いることとした。

3. 転動疲労におけるき裂発生に関する考察

前述のシミュレーション手法を用いてき裂発生メカニズムの検討を行った。まず、介在物をひし形形状(15×15 μm , ヤング率400GPa)とし、最大面圧4,500MPaとした場合の解析を行った。その結果の一例を図9に示す。転動負荷中の内部起点破壊に対しては、従来はモードII(せん断)変形によりき裂発生すると考えられていたが、内部欠陥からのき裂発生挙動に関する最近の研究⁴⁾では、モードI(引張)変形によってき裂が発生する可能性も示唆された。そこで本研究では、モードI変形によりき裂発生すると仮定し、解析結果から任意の方向の引張成分ひずみの変化($\Delta\epsilon$)を求めた。さらに、 $\Delta\epsilon$ が最大になる方向および $\Delta\epsilon$ 値($\Delta\epsilon_{max}$)を評価し図中に示す。また、 $\Delta\epsilon$ が最大になる方向にき裂が発生するとの仮定に基づき、推定されるき裂方向を破線で示す。図より、き裂はいずれの箇所からも転動体移動方向に対して前方斜め上方向(あるいは後方斜め下方向)に進むと推定されることがわかる。一方、図2に示した観察結果では、(a)では、介在物の前後および上下位置から、それぞれ前方斜め上方向と後方斜め下方向にき裂が発生しており、解析による推定とよく一致している。一方、(b)では介在物の前後位置のみからき裂が発生しており、それぞれ、介在物形状の違いに起因する応力集中部位から優先的にき裂が発生したのと考えられる。

また、解析結果に影響を与え得る因子として介在物とマトリクスの界面の接着状態の影響について考察した。ここでは、実際の形状に近づけるため、六角形の介在物モデルを考え、応力シミュレーションを実施した。ここでは、界面の接着状態を変化させ、その影響を検討した。図10に解析結果を示す。界面が剥離した場合で、引張成分のひずみ範囲をもとに予想したき裂発生と方向が転動体移動方向に対して前方および後方となり、観察結果とよく一致することがわかる。一方、せん断ひずみ範囲は

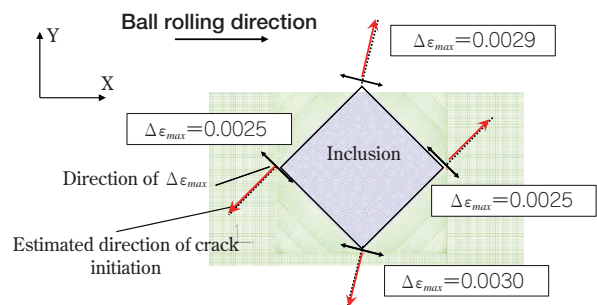


図9 応力解析結果に基づくクラック発生位置と方向の推定
Fig. 9 Estimated direction and location of crack initiation

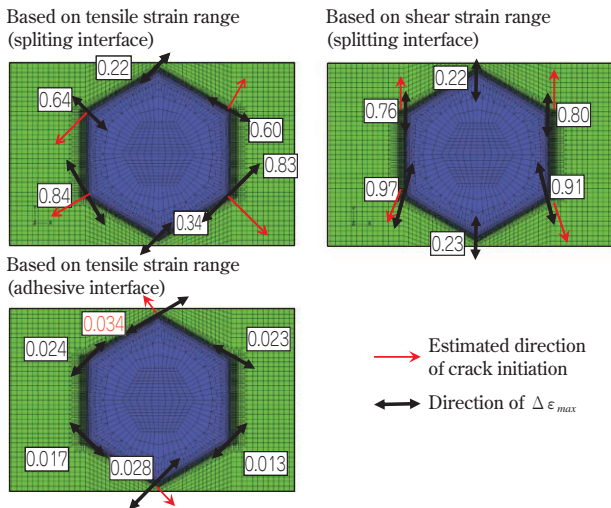


図10 ひずみ範囲に及ぼす介在物/マトリクス界面剥離の影響 (図中の数字は $\Delta \epsilon_{max}$)

Fig.10 Influence of interface condition on tensile and shear strain range

介在物の上下位置で最大となり、き裂発生方向も上下方向となるため、観察結果とは一致しない。以上のことから、転動疲労におけるき裂発生に対する影響因子として、介在物のマトリクスとの界面の密着状況を考慮する必要があることが示唆される。これは、従来から介在物の量やサイズを低減することを疲労寿命改善の主な手段としてきたことに対し、新たな指針を与えるものと考えられる。

むすび=代表的な軸受鋼であるSUJ2を用い、転動疲労における介在物起点のき裂発生状況をFIB-SEMを用いて3次元的に観察し、き裂発生位置と方向についての全体像を明らかにした。また、繰返し負荷を与えたときの介在物周囲のひずみの蓄積の解析手法を確立し、解析と観察結果の比較より、き裂発生に対してせん断応力よりもむしろ引張応力の影響が大きいことを示唆する結果を得た。さらに、き裂発生に対し、介在物のサイズだけでなく、ヤング率とマトリクス界面の密着状況を考慮する必要があることが明らかになった。今後、さらに介在物形態の影響を詳細に検討し、軸受鋼のさらなる長寿命化に向けた取組を継続していく。

最後に、本研究は、財団法人金属材料センター(JRCM)が新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの業務委託により実施する「鉄鋼材料の革新的高強度化・高機能化基盤研究開発研究体」にて行ったことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 家口 浩: トライボロジスト, Vol.46, No.9 (2001), pp.702-705.
- 2) 山川耕志ほか: Koyo Engineering Journal, No.166(2004), pp.24-28.
- 3) 長尾実佐樹ほか: 山陽特殊製鋼技報, Vol.12, No.1 (2005), pp.38-45.
- 4) 藤松威史: 鉄と鋼, Vol.94, No.1 (2008), pp.13-20.