

## 高強度鋼の転動疲労下のはく離損傷および内部き裂形態の観察 Observation of Delamination and Subsurface Crack under Rolling Contact Fatigue in High-strength Steels

牧野 泰三<sup>a</sup>, 根石 豊<sup>a</sup>, 中井 善一<sup>b</sup>, 塩澤 大輝<sup>b</sup>  
Taizo Makino<sup>a</sup>, Yutaka Neishi<sup>a</sup>, Yoshikazu Nakai<sup>b</sup>, Daiki Shiozawa<sup>b</sup>

<sup>a</sup>住友金属工業(株) 総合技術研究所, <sup>b</sup>神戸大学大学院工学研究科  
<sup>a</sup>Sumitomo Metal Industries, Ltd., <sup>b</sup>Kobe University.

転動疲労寿命の向上には、高纯净度化による介在物寸法の低減や基地組織の高強度化など各種因子が挙げられているが、その影響を直接的な観察に基づいて論じたものはほとんどない。そこで本研究では SPring-8 の放射光を用いた CT イメージングによって転動疲労下における内部介在物からのき裂発生・進展挙動を観察することを目的とする。2010A 期では CT イメージングの転動疲労き裂の検出への適用性について検討を行った[1]。本課題研究では介在物を模擬した人工欠陥を導入した試料について実験および評価を行った。破断前に疲労試験を中途止めした試験片から観察用サンプルを切り出し、CT イメージングによる観察を行った結果、欠陥から等間隔に複数のき裂が発生していることが分かった。さらに研磨により人工欠陥周辺について直接観察を行い、CT 結果との比較を行ったところ、CT で観察された人工欠陥から等間隔に発生する疲労き裂は SEM による観察でも確認された。さらに SEM で観察されたき裂とほぼ同じ位置において、き裂部分のコントラストが小さい箇所があるものの、CT によりき裂が検出された。

キーワード： Rolling Contact Fatigue, CT Imaging, High-strength Steels

### 背景と研究目的：

自動車等の輸送機器には軸受、等速ジョイント、ホイールハブ等、長期間転がり接触を受ける（転動）部品が数多く使われている。これらの転動部品では、転動面直下に存在する内部介在物を起点に、その周囲に組織変化をともないつつき裂が発生・進展し、はく離に至ること（転動疲労）が知られている。転動疲労寿命の向上には、高纯净度化による介在物寸法の低減と基地組織の高強度化が有効とされてきた。最近の研究では介在物寸法のみならず、その組成や基地組織との密着性等の因子が影響することが報告されている。これらの報告では、上記した因子を意図的に変えた材料または条件にて実験し、寿命の変化を検討した内容が多く、直接的な観察に基づいたものはほとんどない。この理由としては、転動疲労ではき裂が内部に発生すること、はく離して寿命に到達した段階ではそのはく離が転動によってつぶれ、直接的かつ詳細な観察が難しいことが挙げられる。そこで SPring-8 の放射光を用いた CT イメージングによって転動疲労下における内部介在物からのき裂発生・進展挙動を観察することを目的とする。

本実験課題では、介在物からの転動疲労き裂の発生・進展挙動を評価するために、まず介在物を模擬した人工微小欠陥を導入した試料について実験および評価を行う。そこで人工欠陥が介在物を模擬し得る条件を検討し、転動疲労による欠陥からのき裂発生・進展機構を考察することを目標とした。

### 実験：

供試材は構造用炭素鋼 S55C である。転動疲労試験片形状に加工した後、高周波焼入れを行い、仕上げ加工を行った。転動疲労試験概要および試験片形状を図 1 に示す。介在物を模擬した人工欠陥として、疲労試験における鋼球の軌動線上に放電加工により微小穴を導入した。微小穴人工欠陥の形状としては、直径  $D$  が約  $50\mu\text{m}$  および  $30\mu\text{m}$ 、深さが約  $250\mu\text{m}$  の 2 種類を用意した。これらの試験片に対して森式転動疲労試験機を用いて疲労試験を行った。疲労試験を破損前に中途止めし、試験片から微小穴付近を CT イメージング用の観察サンプルとして切り出した。観察サ

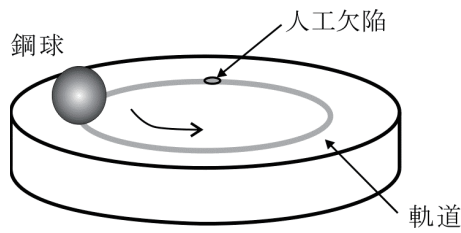


図1. 転動疲労試験概要および試験片形状

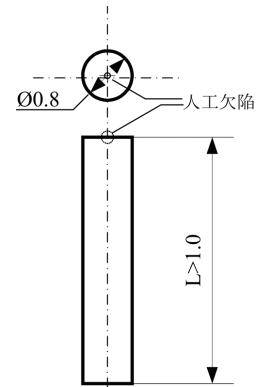
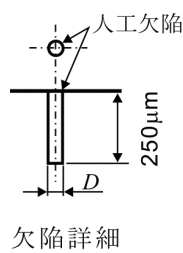


図2. 観察サンプル形状

サンプルの形状を図2に示す。試験片形状は2010A期課題実験結果をもとにφ0.8mmの円柱状とした。

CT撮影はSPring-8のBL19B2ビームラインで行った。検出器にはビームモニタBM3(x10)とCCDカメラ(C4880-41S)の組み合わせを用いた。この組み合わせの検出器の有効ピクセルサイズは0.74μmである。X線エネルギーを37keVとし、0°から180°まで0.2°刻みで回転させながら透過像を得た。試料-カメラ間距離の影響を検討するために350mmおよび700mmと変化させて撮影を行った。

### 結果および考察：

#### ● 測定条件および疲労き裂形状

人工欠陥から発生した疲労き裂を検出する測定条件を検討するために、試料-カメラ間距離および検出器の空間分解能設定を変化させて撮影を行った。検出器の空間分解能設定では、隣り合う4ピクセルを一つのピクセルとして扱う2x2モードと16ピクセルを一つのピクセルとする4x4モードの2種類を用いた。2x2および4x4モードのピクセルサイズはそれぞれ1.48μmおよび2.96μmである。ピクセルの面積が大きくなると空間分解能は低下するが、感度が向上するため露光時間を短くすることができる。

人工欠陥の直径Dが50μm、試験中断時の負荷繰返し数 $N=1.75 \times 10^5$ (cycles)のサンプルの再構成画像の一例を図3に示す。撮影条件としては、X線エネルギーは37keV、試料-カメラ間距離 $L=700$ mm、有効ピクセルサイズは1.48μmである。図3では、CT再構成結果からき裂部分とそれ以外に分離して抽出し、三次元形状を表示しており、図中赤色の部分がき裂部分を、白色箇所が人工欠陥および試料以外の空間(空気領域)を表している。図3より人工欠陥からき裂が等間隔に発生し、試料表面に対してほぼ平行な方向に進展していることが分かる。図3中のき裂と人工欠陥から反対側に存在する同心円状の像は、アーチファクトと呼ばれる再構成時に生じるノイズである。アーチファクトと人工欠陥が重なるため、人工欠陥周囲のき裂を観察することが困難であることが分かった。

アーチファクトはサンプルステージの回転中心に現れるため、試料の設置位置をステージ回転中心から離れた場所にするを試みた。アーチファクト対策を行う前後のCT再構成像の断面図を図4に、アーチファクト対策後のサンプルの再構成

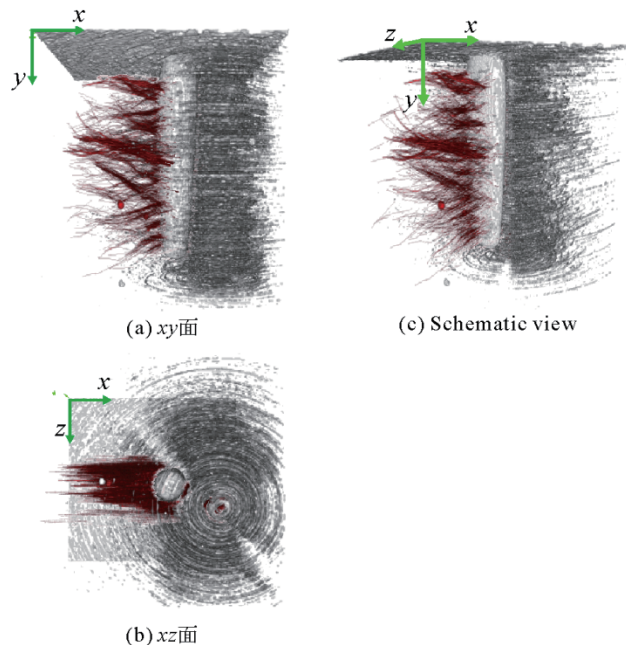
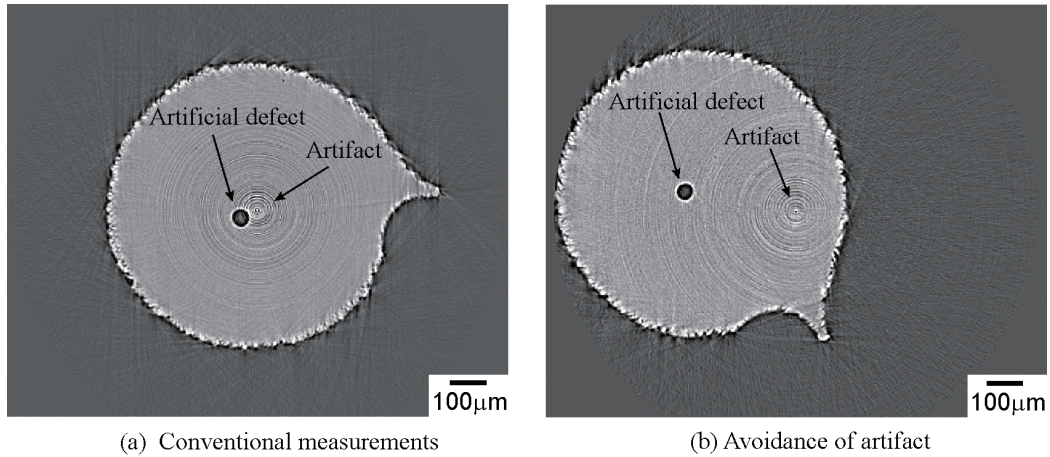


図3. 人工欠陥からの転動疲労き裂形状 (アーチファクト対策無し)



(a) Conventional measurements

(b) Avoidance of artifact

図4 アーチファクト対策の影響

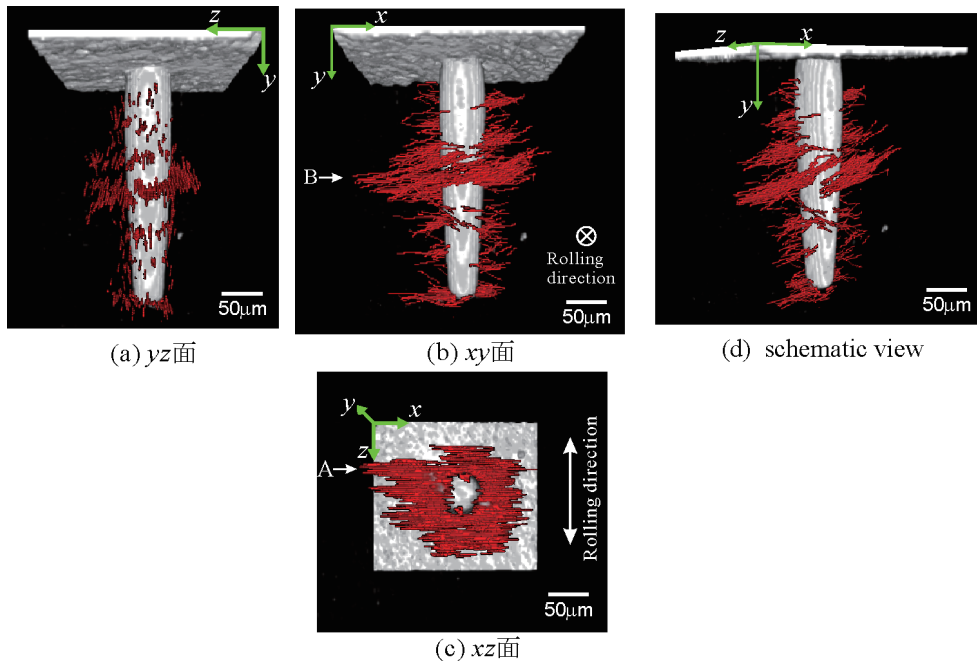


図5. 転動疲労き裂の三次元形状 (アーチファクト対策有り)

成像を図5にそれぞれ示す。図4より、人工欠陥の位置がサンプルステージの回転中心と離れるように設置することにより、人工欠陥とその周囲がアーチファクトの影響を受けないようにすることができていることが分かる。アーチファクト対策を行った観察結果を示した図5より、図3と比較して人工欠陥周囲のアーチファクトが無いいため、人工欠陥の全周囲の疲労き裂を観察できていることが分かる。図5のき裂では、転動方向よりも、転動方向に対して垂直な方向にき裂(図中 A)がよく進展している。またせん断応力が最大となる深さのき裂(図中 B)が、その他の深さにおけるき裂と比較して最も進展している。このような人工欠陥から等間隔に、試料表面に平行に発生・進展するき裂は、2010A 期課題実験において人工欠陥から破損した試験片を観察した際にも観察されている。今回の実験では、中途止めた試験片を観察することにより、せん断応力が最大となり破損の原因となる主き裂よりも表面に近い位置からもき裂が発生していることが確認された。このようなき裂は人工欠陥の直径が  $30\mu\text{m}$  の試験片についても観察された。このことから、これらの最大せん断応力以外の位置から発生するき裂は主き裂の発生・進展に影響を与えることが考えられるため、このようなき裂の発生・進展過程を検討する必要があると考えられる。

- 破壊検査による直接観察との比較

CT 観察に用いた試料に対して、研磨により実際のき裂形状を直接観察し CT イメージングにより検出された疲労き裂の形状との比較を行った。人工欠陥の長軸方向に対して平行に研磨を行い、



研磨断面を SEM(Scanning electronic microscope)により観察した。5 $\mu$ m ピッチでの研磨および SEM 観察を繰り返すことにより、人工欠陥周囲のき裂形状を得た。研磨により露出させた人工欠陥とき裂の SEM 観察結果、および同じ位置における CT の断面像を図 6 に示す。図 6 より CT で観察された人工欠陥から等間隔に発生する疲労き裂は SEM による観察でも確認されていることが分かる。さらに CT ではき裂部分のコントラストが小さい箇所があるが、SEM で観察されたき裂とほぼ同じ位置において CT でもき裂が検出されていることが分かる。CT イメージングにより転動疲労き裂を検出することが可能であり、進展メカニズムを評価するのに十分な検出性能を有することが分かった。

#### 今後の課題：

人工欠陥を導入した試験片について転動疲労試験を行い、CT イメージングを用いて転動疲労き裂を検出した。さらに研磨による破壊検査を行い、直接観察との比較を行ったところ、CT イメージングで検出されたき裂を SEM による観察で確認することができた。これらのことから CT イメージングにより人工欠陥からの転動疲労き裂の発生・進展過程を評価できることが明らかとなった。今回観察された欠陥から等間隔に発生するき裂は、実際の介在物からも発生している可能性がある。また多数のき裂が発生することにより、破断に至る主き裂が発生し成長することが考えられるため、このような疲労き裂の発生メカニズムを評価することにより重要な知見を得られるものと考えられる。そこで様々な繰返し数での中途止め試験片を作製し、観察することにより、欠陥から等間隔に発生する疲労き裂の発生・進展過程を評価する。

#### 参考文献：

[1] 牧野泰三, 根石豊, 中井善一, 塩澤大輝, 2010A 期重点産業利用課題報告書, 2010A1859, (2010).

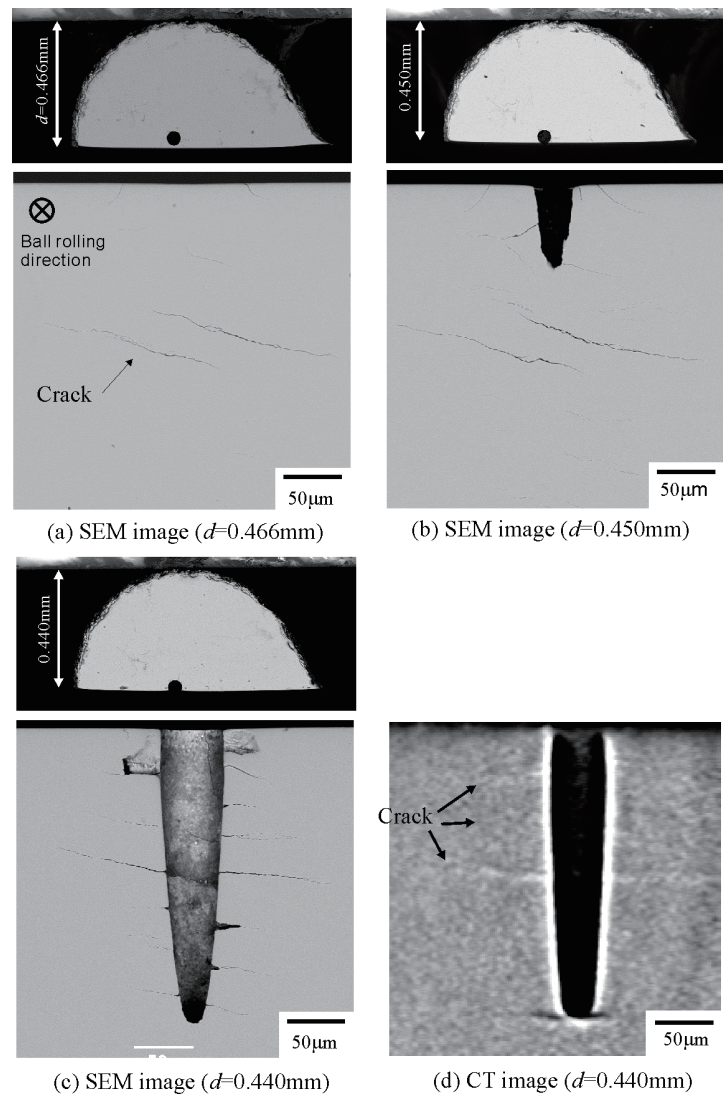


図 6. CT 観察と直接観察の比較