

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^a, 根石 豊^a, 中井 善一^b, 塩澤 大輝^b
Taizo Makino^a, Yutaka Neishi^a, Yoshikazu Nakai^b, Daiki Shiozawa^b

^a住友金属工業（株）総合技術研究所, ^b神戸大学大学院工学研究科
^aSumitomo Metal Industries Ltd, ^bKobe 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。本実験課題では、転動疲労き裂の発生・進展挙動の観察のための試料形状、サイズや測定条件、検出可能な介在物寸法・種類などの基礎的検討を行った。転動疲労試験の破損部を切り出したサンプルについて測定を行った結果、表面から観察されるはく離損傷部以外に、その下にき裂が発生・進展している様子が観察された。さらに介在物を模擬した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、破損部を切り出したサンプルについて測定を行った。観察によりせん断応力が最大となる人工欠陥の深さ位置から発生した、最終破損に至る主き裂とは別に、等間隔に複数のき裂が発生・進展している様子が観察された。これらの複数き裂の発生・進展は介在物寸法および形状から影響を受けることや複数き裂が転動疲労寿命に影響を与えることが考えられる。

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しつつき裂が発生・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、転動疲労き裂の発生・進展挙動の観察のための試料サイズや測定条件、検出可能な介在物寸法・種類などの基礎的データを得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、高周波焼入を行い、仕上げ加工を行った。森式転動疲労試験機を用いて疲労試験を行い (Fig.1 (a)), 破損した試験片からはく離損傷部を CT イメージング用の観察サンプルとして切り出した (Fig.1 (b) - (c))。観察サンプルの形状を Fig.2 に示す。本課題ではサンプル形状の検討のために 2 種類の形状を用意した。転動疲労試験片の表面を切り出した後に破損部が中央に収まるように試験片形状に加工したものを Sample A とした。Sample A では試験片の両端に引張負荷を与えるためのタブを設けている。Sample B では、破損部を中心となるように円柱状に切り抜いており、破損部が円柱の先端に位置している。さらに介在物からのき裂発生を観察を想定し、人工欠陥を導入した試験片について転

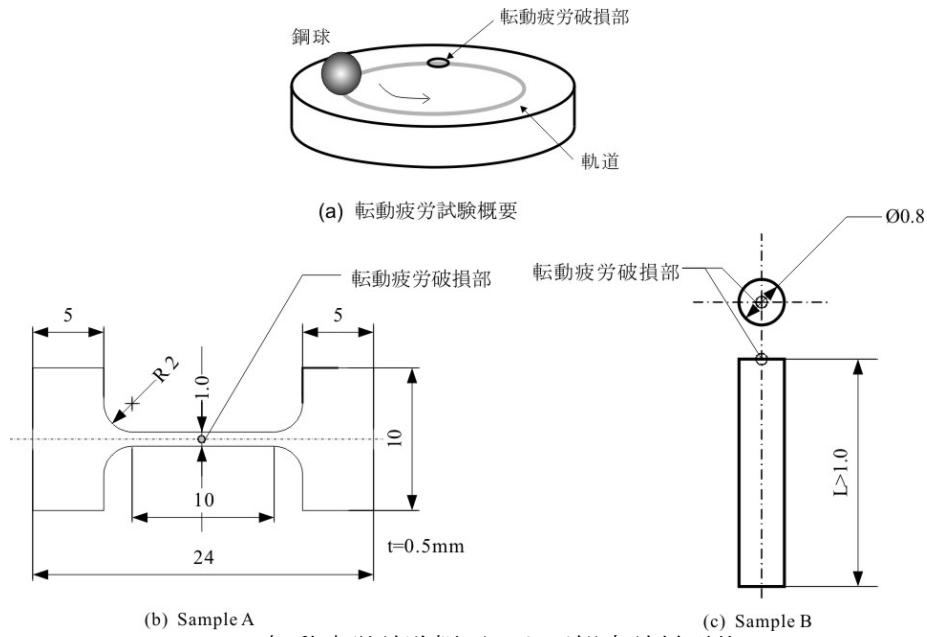


Fig.1 転動疲労試験概要および観察試料形状

動疲労試験を行い，人工欠陥から生じた疲労き裂の観察を試みた．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直径が約 $50\mu\text{m}$ ，深さが約 $250\mu\text{m}$ の微小穴を加工した．人工欠陥から破損した部分を Sample B の形状に切り出したサンプル (Sample C) について CT 観察を行った．

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) および BM2 (f=50) と CCD カメラ (C4880-41S) を用いてこれらの組合せについて検討した．ビームモニタ BM3 (x10) 使用時の有効ピクセルサイズは $0.74\mu\text{m}$ ，BM2 (f=50) 使用時には $2.8\mu\text{m}$ となる．BM3 (x10) を使用した場合の透過像を得るための露光時間は 10 秒であるのに対し，BM2 (f=50) の使用時には露光時間は約 0.2 秒となり，1 回あたりの撮影時間を短縮することができる．その他の測定条件では，X 線エネルギーを 37keV ，試料-カメラ間距離を 700mm 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．

結果および考察：

- サンプル形状の影響

Sample A では，Feedback projection 法のプログラムがエラーにより停止して再構成できない箇所があり，再構成結果も実際の断面形状とならないなど，3 次元形状に再構成することができな

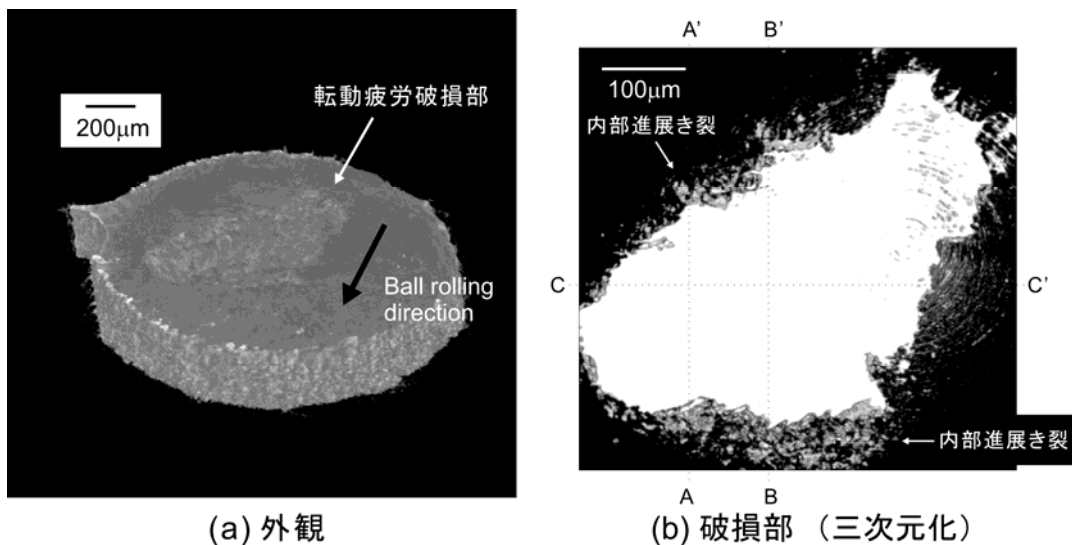


Fig.2 はく離および内部進展き裂の CT イメージ概要

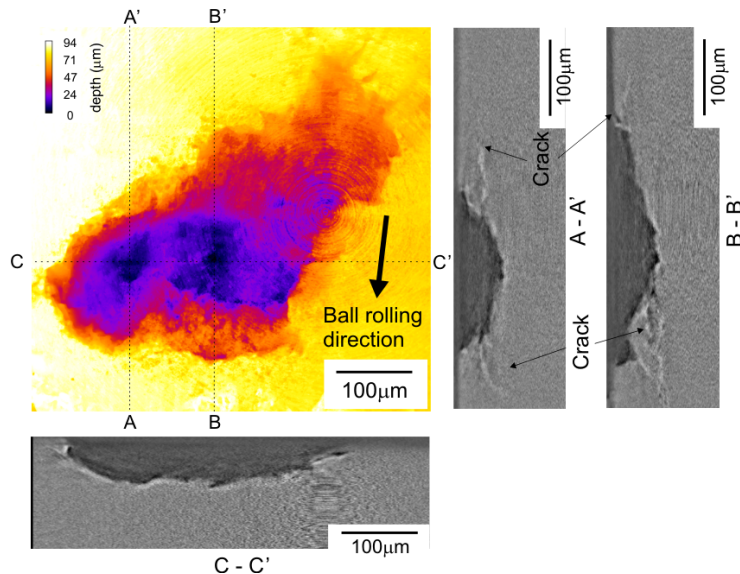


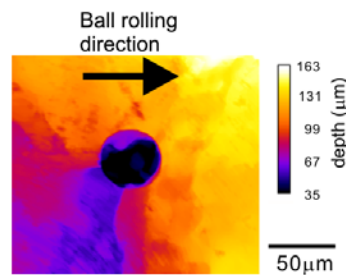
Fig.3 はく離および内部進展き裂の詳細

った。これはサンプルの断面形状が四角形であるため、X線の入射方向によってX線の透過厚さが異なり、鉄に対する透過限界寸法を超えた箇所が含まれていたものと考えられる。一方、Sample Bでは全てのサンプルについて再構成が可能であった。Sample Bでは入射方向に対する断面形状は直径0.8 μmの円であり、透過厚さはどの入射角度に対してもほぼ均一となっている。

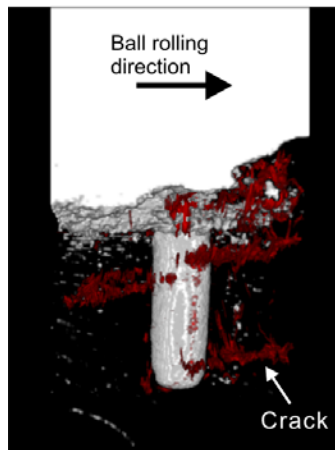
● 転動き裂形状の特徴

ビームモニタ BM3 (x10) を用いた場合における Sample B の再構成画像の一例を Fig. 2 および 3 に示す。

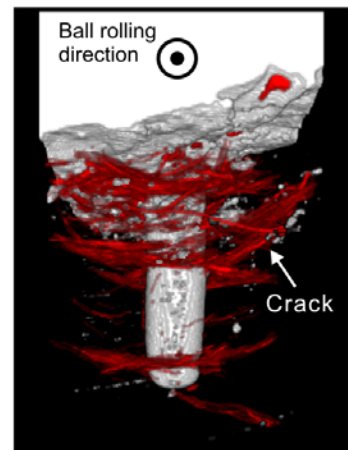
Fig.2 (a) はサンプル全体像を、(b) は破損部およびき裂を2値化処理により白色で示した3次元像を上部から見た図を示したものである。また Fig.3 ははく離部の高さ分布図および断面図を示したものである。Fig.2 (a) および (b) より、試料先端の破損部では、表面に現れたはく離部の下にき裂が発生・進展していることが分かる。また Fig.2 (b) より、この内部き裂は鋼球の転動方向に沿って進展していることが分かる。Fig.3 よりはく離による脱落部の他にも、損傷部から発生した内部進展き裂の分布を観察することができることが分かった。このように放射光 CT イメージングにより内部介在物からの転動疲労き裂進展を観察できる可能性がある。



(a) Top view



(b) Side view



(c) Side view

Fig.4 人工欠陥からの内部進展き裂

● 人工欠陥を導入した転動疲労試験片

人工欠陥を導入した試験片における破損部の CT 像の一例を Fig.4 に示す。Fig.4 (b) は鋼球の摺動方向に垂直な方向から人工欠陥を観察した図であり、Fig.4 (c) は (b) に対して 90° 回転した方向から観察した図である。ただし Fig.4 (b) では得られた再構成した CT 画像より、き裂部分のコントラストの強調処理をした後、二値化処理によりき裂を3次元画像化している。き裂はせ

ん断応力が最大となる深さにおいて発生し、最終的な破損が生じていた。Fig.4 (b) および (c) より、破損に至った主き裂より深い位置においても人工欠陥からき裂が発生、進展していることが CT 像より分かる。さらに主き裂となったき裂を含めこれらの 3 カ所のき裂は等間隔の深さに発生していた。介在物を模擬した人工欠陥を用いた試験片について CT イメージングを行い、等間隔に現れるき裂の進展過程を観察し、介在物寸法および形状が転動疲労き裂の発生・進展に与える影響について検討する必要がある。今後、最終的な破損に至る主き裂以外のき裂の発生について詳細に観察するために、疲労試験を中途止めしたサンプルについても観察を行う予定である。

今後の課題：

検出器について有効ピクセルサイズが $0.74\mu\text{m}$ のビームモニタ BM3 (x10) と $2.8\mu\text{m}$ のビームモニタ BM2 (f50) を比較したところ、転動疲労き裂の観察には、ビームモニタ BM3 (x10) の空間分解能が必要であることが分かった。

今回の課題実験から転動疲労き裂の検出に必要なサンプル形状および測定条件が明らかとなった。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、転動疲労き裂の発生・進展過程を詳細に観察し、介在物からのき裂発生を観察する手法を確立するとともに、介在物寸法がき裂発生に与える影響について検討を行う予定である。