

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。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、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観察を行った[1,2]。本実験では転動疲労過程でのき裂発生状況、特に転動面に対して垂直に発生するき裂の発生・進展状況の評価を行った。なお転動面に垂直に発生するき裂をより明確化することを目的として、試験片に引張負荷を与えて CT 撮影を行った。中途止めをした試験片から観察用サンプルを切り出し、引張負荷を与えて CT イメージングによる観察を行った結果、転動面垂直方向に発生するき裂と、人工欠陥深さ方向に等間隔な水平き裂が複数発生していることが分かった。さらに人為破断させた人工欠陥周辺の破面を SEM で観察し、CT 像との比較を行ったところ、破面 SEM 像と CT イメージング像の形態は概ね一致していることが分かった。

キーワード： Rolling 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。

2010B 期課題実験では、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、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った。CT イメージングとともに研磨と走査型電子顕微鏡による観察との比較を行ったところ、CT イメージングでは転動疲労き裂の進展挙動を評価するのに十分な性能を有していることが確認された。さらに転動面に対して垂直なき裂が検出され、このき裂が転動疲労き裂の進展メカニズムに重要な役割を果たしている可能性が考えられた。そこで本実験課題では、本実験では転動疲労過程でのき裂発生状況をさらに詳細に観察するとともに、特に転動面に対して垂直に発生するき裂の発生・進展状況の観察し、転動疲労におけるき裂の発生・進展機構の考察を目標とした。

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。転動疲労試験概要を図 1 に示す。介在物を模擬した人工欠陥として、疲労

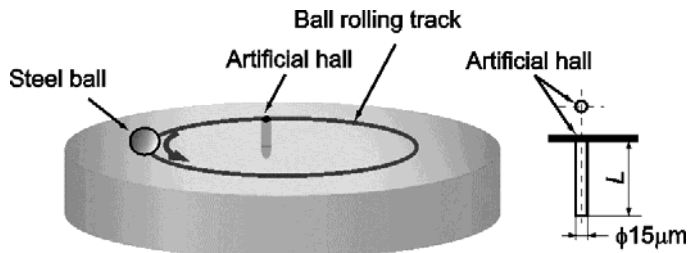


図 1. 転動疲労試験概要

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、直径が約 $\phi 15\mu\text{m}$ 、深さ L が約 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ および $200\mu\text{m}$ の 4 種類を用意した。人工欠陥の直径は、2010B 期に用いた人工欠陥寸法からさらに小さく、実際に存在する介在物に近い寸法となっている。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。2010B 期においても転動面に対して垂直に発生するき裂は観察されたが、不鮮明な形状しか得られなかった。本課題実験で用いた観察サンプル形状を図 2 に示す。サンプル形状は両側に引張荷重を与えるためのタブを設けており、2009 年 B 期課題実験結果をもとに、人工欠陥近傍部分を $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ の正方形断面とした。また CT イメージングの際に使用した引張試験機を図 3 に示す。転動面に垂直なき裂に注目し、引張荷重により垂直なき裂を開口させることを試みた。サンプルに与える引張荷重は約 20MPa 、 40MPa 、 200MPa および 400MPa とし、荷重をかけた場合のき裂検出に及ぼす影響を検討した。

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 (浜松フォトニクス社製 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 $0.74\mu\text{m}$ 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。サンプル-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：

- 転動疲労き裂形状

人工欠陥の深さ $L=200\mu\text{m}$ 、試験中断時の負荷繰返し数 $N=1 \times 10^4(\text{cycles})$ および $N=1 \times 10^6(\text{cycles})$ のサンプルの再構成画像の一例を図 4 に示す。撮影条件としては、サンプル-カメラ間距離 $L=350\text{mm}$ 、有効ピクセルサイズは $0.74\mu\text{m}$ である。図 4 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、図中赤色の部分が転動面に対して水平なき裂部分を、図中青色の部分が垂直なき裂部分を、また図中の円柱状の白色箇所が人工欠陥を表している。図 4 より 2010 年 B 期の実験結果と同様に人工欠陥から転動面に対して水平なき裂が等間隔に発生し進展しており、さらに転動面に垂直なき裂を明確に検出していることが分かる。さらに転動面に垂直なき裂の発生・進展を明確に検出することができた。図 4(a)では垂直なき裂がサンプル表面からおよそ $25\mu\text{m}$ 程度進展しており、深さ $100\mu\text{m}$ 付近にも複数の垂直なき裂が発生していることが分かった。一方図 4(b)では垂直なき裂がさらに深さ $150\mu\text{m}$ 付近まで到達しており、さらに転動面水平方向のき裂が長くなっていることが分かる。これらの結果から、転動の繰返しとともに、まず人工欠陥の転動面に面した縁近くに垂直なき裂が発生する、そしてこれが人工欠陥に沿っ

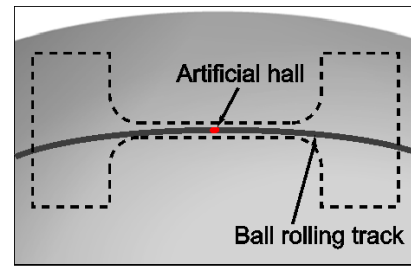


図 2. 観察用サンプル形状

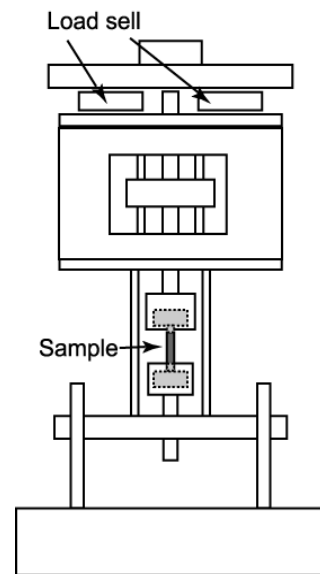


図 3. 引張試験機

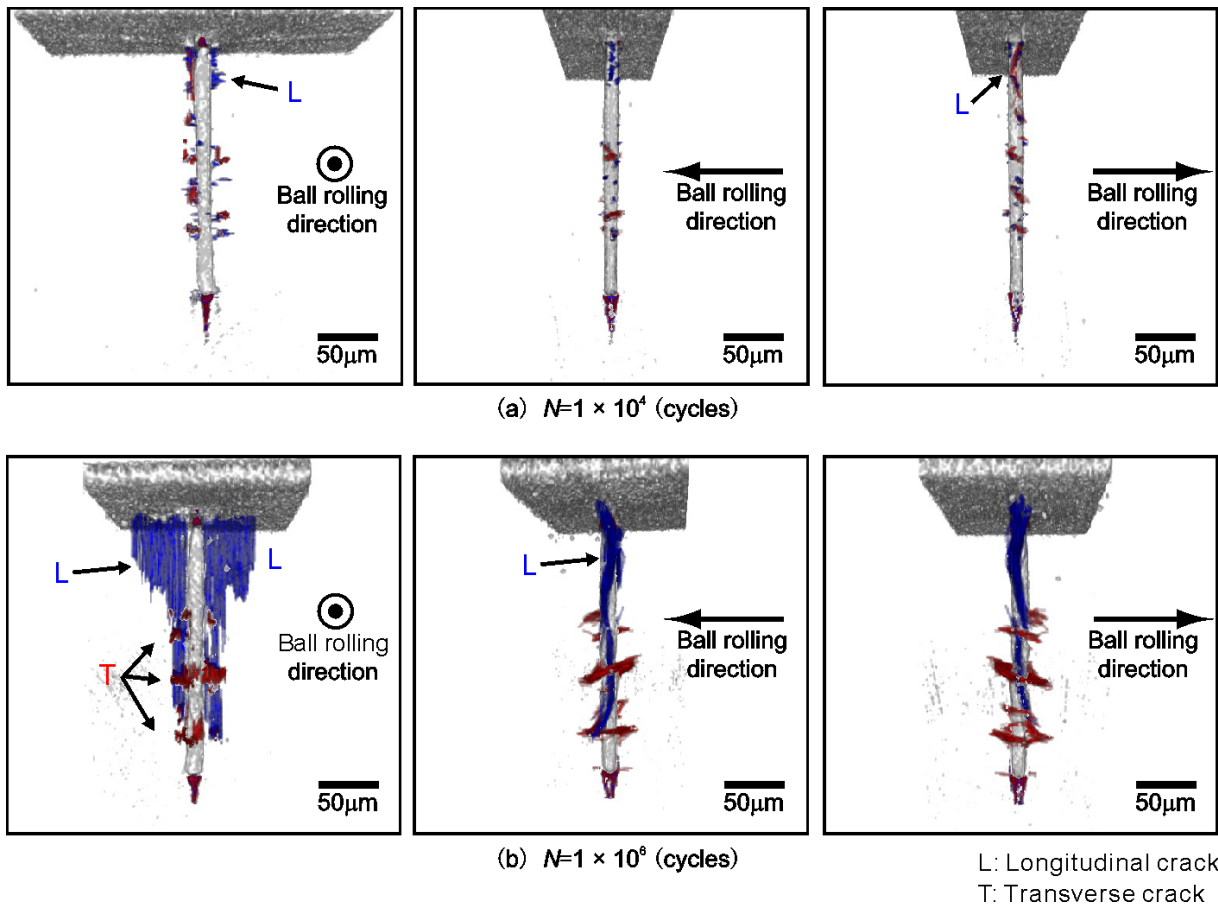


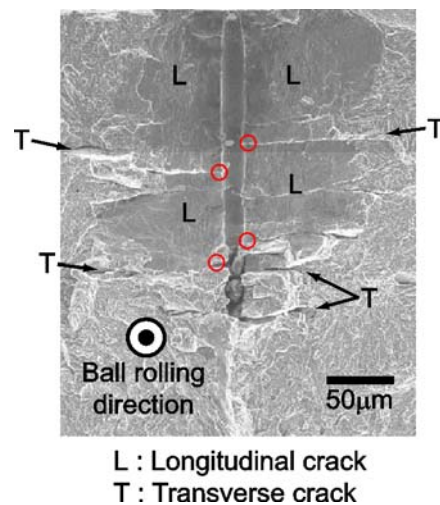
図 4. 転動疲労き裂の CT イメージ

て進展する過程で、内部に横き裂が発生し、転動面平行方向に進展することが推定される。

2010年A期およびB期の実験結果と比較して本実験結果ではより鮮明に垂直き裂が検出された。引張負荷の影響は再構成画像には現れなかった。垂直き裂が検出された要因として CT 撮影の測定対象に対する放射光の透過方向の違いが挙げられる。2010B 期での実験では転動面に水平なき裂に着目し、放射光の透過方向と転動面が水平となるようにサンプルを設置して撮影を行っていた。この場合、水平なき裂においては開口したき裂がどの入射角度でも投影画像に現れるのに対して、転動面に垂直なき裂においてはき裂と放射光が平行な場合のみ開口したき裂が投影画像に現れる。2011A 期に用いたサンプル形状では、垂直き裂がどの入射角度からもき裂が投影画像に現れるため、再構成画像において垂直き裂を明瞭に検出できたものと考えられる。

● 破壊検査による直接観察との比較

CT 観察に用いた $N=1 \times 10^6$ (cycles) のサンプル(図 4(b))に対して、強制破断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転動疲労き裂の形状との比較を行った。サンプルを液体窒素で冷却した後、人為的に強制破断して現われた断面を SEM(Scanning electronic microscope)により観察し、人工欠陥周囲のき裂形状を得た。露出させた人工欠陥とき裂の SEM 観察結果を図 5 に示す。図中の L は転動面に垂直なき裂を、T は水平なき裂を表している。図 5 より垂直き裂は人工欠陥表面から欠陥深さ方向に約 $150\mu\text{m}$ まで進展していること、転動面に平行なき裂が等間隔に発生していることが分かる。



L : Longitudinal crack
T : Transverse crack

図 5. 破面 SEM 像

垂直き裂の深さおよび平行き裂の発生位置や本数は CT 像(図 4(b))で観察された結果と概ね一致していることから、CT イメージングにより垂直なき裂の検出をすることが可能であることが分かった。

図 5 中の赤丸は垂直き裂破面上の水平き裂位置に段差が存在している個所を表している。CT 像の観察結果より、破面上の段差の位置は、図 4(b)に示したように表面から進展した垂直き裂と内部の垂直き裂の重なり合う位置や、垂直き裂が水平き裂へと分岐・屈曲している位置と一致している。したがって、この段差は水平き裂が発生した後、垂直き裂が進展することにより生じたものではないことが分かる。垂直き裂と水平き裂の発生過程は転動疲労損傷メカニズムを解明するうえで非常に重要であるため、垂直き裂の進展挙動と水平き裂の発生過程を詳細に観察する必要がある。

今後の課題：

転動疲労が問題となる実際の寸法を有する微小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観察を行ったところ、転動面に対して水平および垂直なき裂を検出した。さらに強制破断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は SEM による観察結果と概ね一致することが確認された。これらのことから CT イメージングにより転動疲労の損傷メカニズムにおける新しいモデルを提案できる可能性があることが分かった。実際の介在物についても同様の転動疲労き裂が発生しているか確認するために、介在物を多く有する試験片に対して疲労試験を行い、CT イメージングを適用することにより実際の介在物における疲労き裂発生・進展挙動の観察を行う。また中途止め繰返し数を変化させて観察を行った結果、垂直き裂の発生が、破断に至る主き裂の発生・進展に影響を及ぼす可能性が考えられた。この損傷メカニズムが確認されれば、疲労寿命に及ぼす介在物の形状および分布の影響について重要な指針を得ることが可能となるため、今後連続観察手法を構築することにより、損傷メカニズムの検証を行う。

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).
- [2] 牧野泰三, 根石豊, 中井善一, 塩澤大輝, 2010B 期重点産業利用課題報告書, 2010B1859, (2010).