

## 放射光 X 線ラミノグラフィによる転動疲労き裂発生および進展挙動の その場観察-異なる配向形態観察の試行

### In-situ Observation of Fatigue Crack Initiation and Propagation under Rolling Contact by SR X-ray Laminography – Trial Inspection for Different Orientation Morphology

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>, 菊池 将一<sup>b</sup>  
Taizo Makino<sup>a</sup>, Yutaka Neishi<sup>a</sup>, Yoshikazu Nakai<sup>b</sup>, Daiki Shiozawa<sup>b</sup>, Shoichi Kikuchi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>新日鐵住金(株) 技術開発本部鉄鋼研究所, <sup>b</sup>神戸大学大学院工学研究科  
<sup>a</sup>Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, <sup>b</sup>Kobe University

表面下内部の介在物から発生・進展する転動疲労のメカニズムを解明するために、ラミノグラフィと小型転動疲労試験機を組み合わせた観察手法を用いて、転動き裂の発生およびはく離形成挙動の観察を行っている。これまでに転動面に対して垂直な方向に配向する円柱形状の介在物(垂直介在物)を有する材料について、き裂の発生および進展挙動を観察することに成功した。本課題実験では、介在物の配向形態が転動疲労き裂に与える影響を検討するために、転動面に平行に配向する円柱状の介在物(水平介在物)を有する試験片に対して転動疲労き裂の観察を行った。転動疲労試験を中途止めした試験片についてラミノグラフィによる観察を行ったところ、水平介在物においても介在物から発生した転動疲労き裂を観察できること、さらに小型転動疲労試験機と組み合わせることによりその進展過程を観察できることを明らかにした。

**キーワード：** 転動疲労(Rolling Fatigue), ラミノグラフィ(Laminography),  
高強度鋼(High-strength Steels)

#### 背景と研究目的：

転動疲労は表面下内部の介在物からき裂が発生・進展するため、き裂進展挙動を観察することが困難である。さらに損傷部ははく離することから、破面観察から得られる情報も限定される。これらのことから、転動疲労の強度向上に必要な介在物寸法や基地組織の高強度化などの、転動疲労メカニズムにおける影響を直接的な観察に基づいて検討したものはほとんどない。本研究では SPring-8 の放射光を用いた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・進展挙動を観察し、転動疲労のメカニズムを解明することを目的とする。本研究では、CT イメージングが適用できない平板状の試料に対しても内部観察が可能な放射光ラミノグラフィ(Synchrotron radiation computed laminography: SRCL)[1][2]をき裂の観察手法として適用した。これまでの研究により、転動面に対して垂直な方向に配向する円柱形状の介在物(垂直介在物)が存在する場合において、介在物からの転動疲労き裂の発生および進展過程について観察を行っている[3-6]。本課題実験では、転動面に平行に配向する円柱状の介在物(水平介在物)が存在する場合に対して転動疲労試験とラミノグラフィによるき裂の発生と進展を観察することにより、介在物の配向形態が転動疲労に与える影響について調査を行った。実際のベアリングでは、転動球の摺動方向に対して、この水平介在物と同じ配向形態をとることが多い。水平介在物を有する試験片に対する事前の調査では、垂直介在物の場合と比較して、疲労寿命のばらつきが大きいことや、転動疲労試験中に表面き裂が発生し、その周囲からフレーキングが生じることが分かった。そこで、あらかじめ転動疲労試験を行い、表面き裂が発生した試験片についてラミノグラフィ撮影による介在物形状と表面き裂の内部形状の関係を検討することを目的とした。さらに SPring-8 内で転動疲労試験とラミノグラフィ撮影を繰返し行うことで、表面き裂の進展挙動を調べた。

#### 実験：

##### 転動疲労試験機および試験片

介在物から発生するき裂を観察するために、転動疲労起点となる主たる介在物が MnS となるよ

うに調整した。多量の S 量(0.049 mass%) を含有する SUJ2 鋼(表 1)を、真空溶解炉を用いて 150 kg インゴットを溶製した。溶製したインゴットは、熱間鍛伸により直径 70 mm の棒鋼に加工し、更に球状化焼鈍処理を施した後、試験片における転動疲労評価面が、棒鋼の長手方向に対して平行な直面(縦断面)となるように板材を粗加工によって切り出した。その後、加熱温度 830°C、均熱時間 40 min の焼入れ処理と、加熱温度 180°C、均熱時間 120 min の焼戻し処理を行った。さらに熱間鍛伸方向に対して垂直な方向が試験片長手方向、平行な方向が試験片幅方向となるように加工した。この試験片長手方向は転動疲労試験における摺動方向である。試験片は厚さ 1 mm、幅 10 mm、長さ 24 mm の平板形状であり、熱間鍛伸により介在物は転動面に対して平行で、かつ摺動方向に対して垂直な方向に伸長した形を有している。

転動疲労試験は、開発した小型転動疲労試験機で行った。本疲労試験機では、森式転動疲労試験機では一方のみにボールが摺動するのに対して、本疲労試験機ではラミノグラフィの観察部位上をボールが往復する様式である。直径 6.0 mm のセラミック球を用いており、ボールの摺動距離は 3 mm である。SPring-8 においてラミノグラフィによる測定と表面のレプリカ法による観察、疲労試験を繰り返しながらフレーキング形成過程の連続観察を行った。実介在物材および人工欠陥材ともに、最大ヘルツ圧  $P_{\max}$  は 5.39 GPa とした。

#### ラミノグラフィ観察条件

BL46XU ビームラインにおいて放射光ラミノグラフィの測定を行った。測定装置の外観を図 1 に示す。撮影では Si モノクロメータにより単色化した X 線を用いた。検出器にはビームモニタ BM(x10)と CCD カメラ(C4880-41S)の組み合わせを用いた。検出器は 4 つのピクセルで 1 つの検出画素を構成する 2×2 ビニングモードを使用し、このときの有効ピクセルサイズは 0.74  $\mu\text{m}$  である。また一部ではき裂の確認を目的として 4×4 ビニングモードを用いた。ラミノグラフィの回転軸の傾斜角を  $\phi=30^\circ$  とした。X 線エネルギーを 37 keV とし、 $0^\circ$  から  $360^\circ$  まで  $0.5^\circ$  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  $L$  は 300 mm とし、露光時間は 2×2 ビニングモードでは 4 秒である。

#### 結果および考察：

##### 実験結果

水平介在物を有する試験片における表面での観察結果の例を図 2 に示す。この試験片では、繰返し数  $N=7.00 \times 10^6$  cycles で、転動面において摺動方向に垂直なき裂が進展していることが分かる(図 2(a))。その後、SPring-8 において疲労試験を行ったところ、 $N_f=7.10 \times 10^6$  cycles でフレーキングが発生した(図 2(b))。

ラミノグラフィによる観察結果から介在物およびき裂を 3 次元表示した結果を図 3 に示す。同図では摺動方向を  $x$  軸、板厚方向(深さ方向)を  $z$  軸とし、上面および側面から観察した再構成像をそれぞれ示している。図 3(a)より、表面き裂が確認された箇所から深さ方向にき裂(赤色)が進展していることが分かる。このき裂は表面付近の介在物(黄色)から発生していた。さらに図 3(b)では、図 3(a)に  $N=7.1 \times 10^6$  cycles での観察結果を重ねて表示している。一つ前の観察結果でのき裂形状とフレーキング形状の比較から、介在物から発生して深さ方向に進展したき裂がフレーキングの一部となっていることが分かる。したがって、フレーキングの起点は表面付近の介在物であり、この介在物から発生し深さ方向に進展したき裂が、水平方向に進展するせん断型き裂の発生に影響を与え、フレーキングに至った可能性が考えられる。このような表面付近で発生した後、深さ方向に進展するき裂は、垂直介在物においても確認されている[6]。

表 1. 供試鋼(SUJ2)の代表的な化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
1.00	0.35	0.47	0.006	0.049	1.50	Bal.

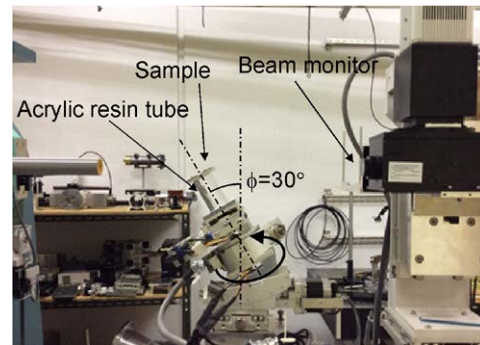


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

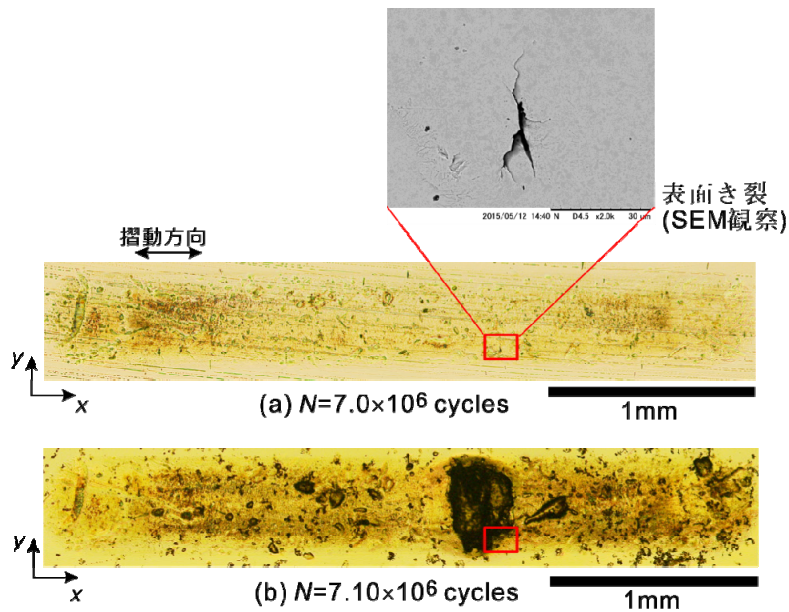


図2. フレーキングに至った試験片の表面観察結果

図2および3以外の表面き裂に対してもラミノグラフィによる観察を行った。観察を行った表面き裂の例を図4に示す。図4に示した表面き裂が存在する位置の直下に介在物が存在することは確認されたが、き裂らしきものは検出されなかった。これはき裂の深さが非常に小さく、ラミノグラフィによる検出限界以下のき裂の深さであったことが考えられる。垂直介在物においては、図4(b)に示したような20  $\mu\text{m}$ 程度のき裂長さまで進展したき裂では、深さ方向へ進展したき裂がラミノグラフィにより観察された。水平介在物の場合では、介在物の形状および寸法によっては、表面き裂は発生するが、そのき裂深さは浅く、その後深さ方向に進展しなかったことも考えられる。このように水平介在物と表面き裂、およびき裂の深さ方向への進展挙動がフレーキング形成に与える影響について、さらに検討が必要である。

#### 今後の課題：

本課題実験では、転動面に水平に配向する介在物においても、ラミノグラフィにより、転動疲労き裂の観察が可能であることが分かった。また転動面に垂直に配向する介在物と同様に、表面き裂および深さ方向に進展するき裂が確認された。一方で水平介在物における表面き裂は、垂直介在物の場合と比較してラミノグラフィで検出されない場合が多い傾向があることが分かった。表面き裂が発生および進展する介在物の形状・寸法や、水平介在物と表面き裂、およびき裂の深さ方向への進展挙動がフレーキング形成に与える影響についてさらに検討が必要である。

#### 参考文献：

- [1] 佐野雄二 他、平成23年度 重点産業利用課題成果報告書(2011B), 2011B1861.
- [2] 釣谷浩之 他、マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集(2012).
- [3] 牧野泰三 他、平成25年度 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2013A), 2013A1786.
- [4] 小濱友也 他、日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス(2014), OS2121.
- [5] T. Makino et al., *International Journal of Fatigue*, vol. 68, pp.168-177 (2014).
- [6] 牧野泰三 他、平成26年度 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2014A), 2014A1562.

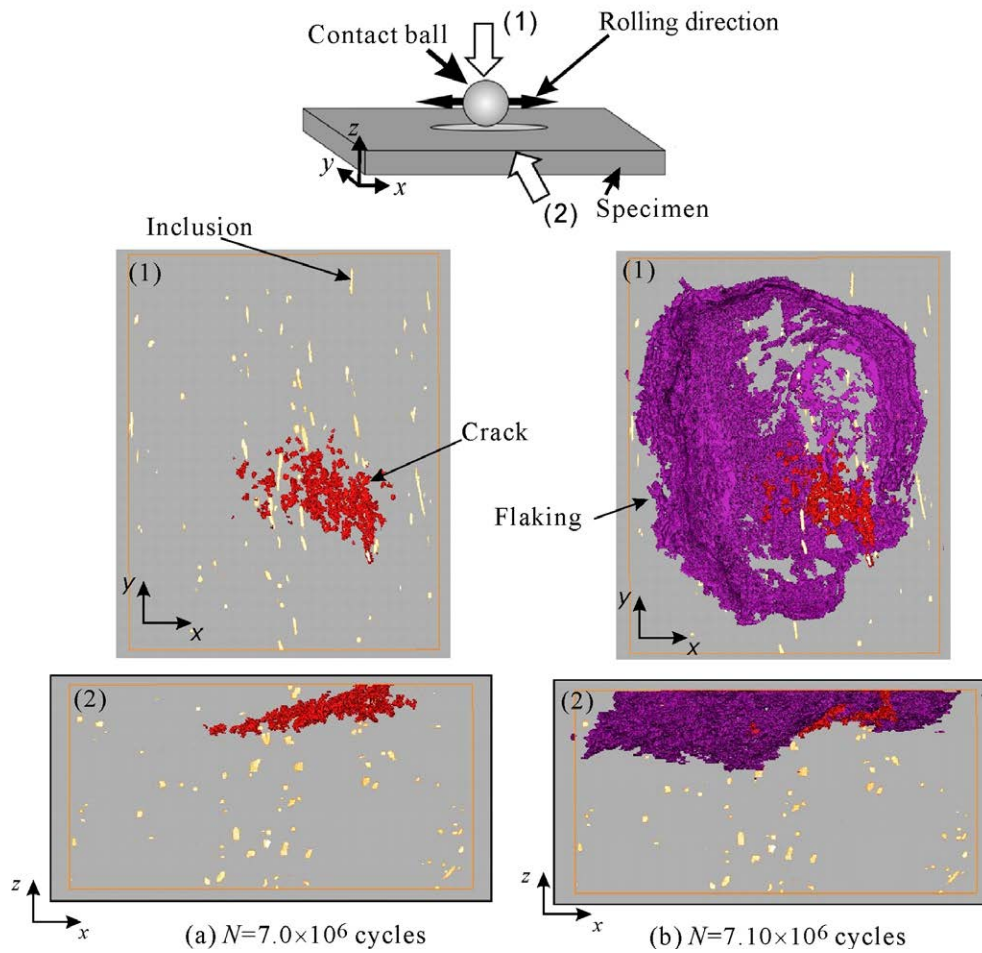


図3. 水平介在物から発生した転動疲労き裂の進展挙動

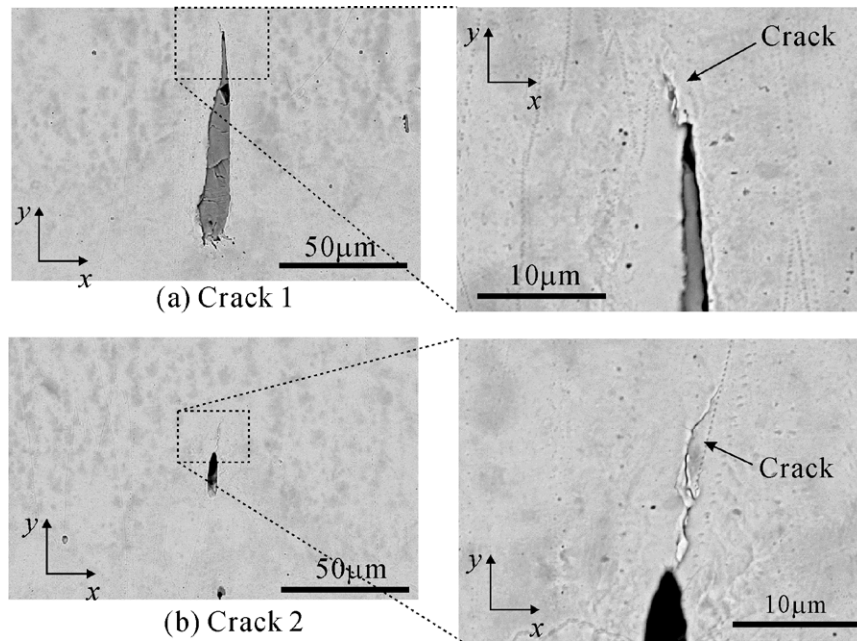


図4. ラミノグラフィにより検出できなかった表面き裂および介在物