

放射光 X 線ラミノグラフィによる転動方向硫化物配向材と 酸化物系介在物分散材における転動疲労損傷の発達過程の観察 Observation of Rolling Contact Damage in the Material with Inclusions Oriented in Rolling Direction and Distribution of Oxide Inclusion by SR X-ray Laminography

牧野 泰三^a, 根石 豊^a, 中井 善一^b, 塩澤 大輝^b, 菊池 将一^b
Taizo Makino^a, Yutaka Neishi^a, Yoshikazu Nakai^b, Daiki Shiozawa^b, Shoichi Kikuchi^b

^a新日鐵住金(株) 技術開発本部鉄鋼研究所, ^b神戸大学大学院工学研究科

^aNippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, ^bKobe 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)や転動面に水平かつ転動方向に直角に配向する介在物を有する材料(T 方向材)について、き裂の発生および進展挙動を観察できた。本課題実験では、介在物の配向および形状が転動疲労き裂進展に与える影響を調査するために、転動面に平行かつ転動方向と同方向に配向する介在物(L 方向)に対して転動疲労き裂の進展挙動観察を行った。L 方向材に対して、介在物から転動方向に表面き裂が発生した段階で疲労試験を中途止めした試験片を SPring-8 に持ち込み、転動疲労試験とラミノグラフィ測定を繰り返して行った。転動方向に進展したき裂についてその後の進展挙動を観察したが、ビームタイム中に顕著な進展は見られなかった。さらに酸化物系介在物についても同様に表面き裂が発生した試験片に対してラミノグラフィ測定を行ったところ、MnS 系介在物と同様に介在物にそってき裂が発生・進展していることが分かった。

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)

1. 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)をき裂の観察手法として適用した[1][2]。これまでに転動面に垂直に配向する円柱状の介在物(垂直介在物)および、転動面に平行で転動方向に対して垂直な方向に配向する円柱状の介在物(T 方向介在物)が存在する場合に対して、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ている。観察の結果、転動面付近の介在物を起点として、転動面から深さ方向に進展するき裂(垂直き裂)が発生した後、転動面に平行なせん断型き裂が発生することが明らかとなった[3]-[7]。さらに配向形態に応じて垂直き裂の発生および進展速度が異なることが明らかとなりつつある。2016B 期課題実験[8]ではこれまでに検討していない配向形態である、転動面に平行かつ転動方向と同方向(L 方向)に配向する介在物(L 方向介在物)について転動疲労過程の観察を行った。この介在物は水平 T 方向介在物から 90°回転させた方向に配向しており、T 方向介在物と比較して転動方向の介在物の投影面積は小さくなる。これまでの配向形態との比較を行うことで、転動疲労に影響を充てる介在物形状の特徴パラメータが明らかになるものと考えられる。2016B 期ではフレーキング直前と思われるき裂を有する介在物に対してラミノグラフィ撮影を行い、垂直介在物および T 方向介在物と同様に転動表面付近の介

在物から発生したき裂がフレーキング形成に重要な役割を担っていることが分かった[8]。そこで 2017B 期課題実験では、この介在物を起点としたき裂の発生初期における挙動を、ラミノグラフィ撮影により観察することを目的とした。さらに、新たな試みとして酸化物系介在物を起点とする転動き裂を観察することを目的として、試作した酸化物系介在物を有する試験片に対して、転動疲労試験とラミノグラフィ測定を行い、フレーキングに繋がるき裂の観察を試みた。

2. 実験：

2.1 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。軸受鋼 SUJ2 鋼をベースとして、多量の S 量 (0.049 mass%) を含有する鋼 (表 1) を、真空溶解炉を用いて 150 kg インゴットとして溶製した。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。試験片は厚さ 1 mm、幅 10 mm、長さ 24 mm の平板形状であり、図 2(c) に示すように熱間鍛伸により介在物は転動面に対して平行であり、転動方向と同じ方向に伸長した形状をしている。

転動疲労試験は、実験者らが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向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。最大ヘルツ圧 P_{max} は 5.39 GPa とした。

2.2 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。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 (FLASH4.0) の組み合わせを用いた。検出器は 4 つのピクセルで 1 つの検出要素を構成する 2x2 ビニングモードがある。

表 1. 供試鋼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.

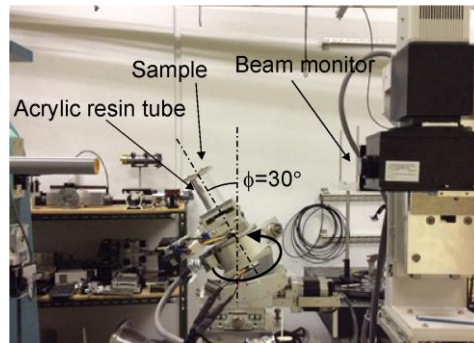


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

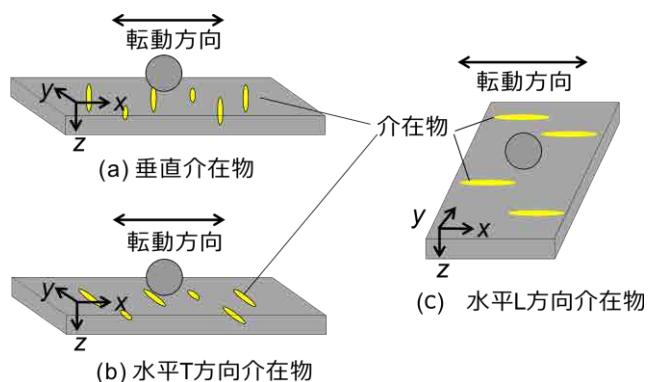


図 2. 介在物配向形態と転動疲労方式の関係

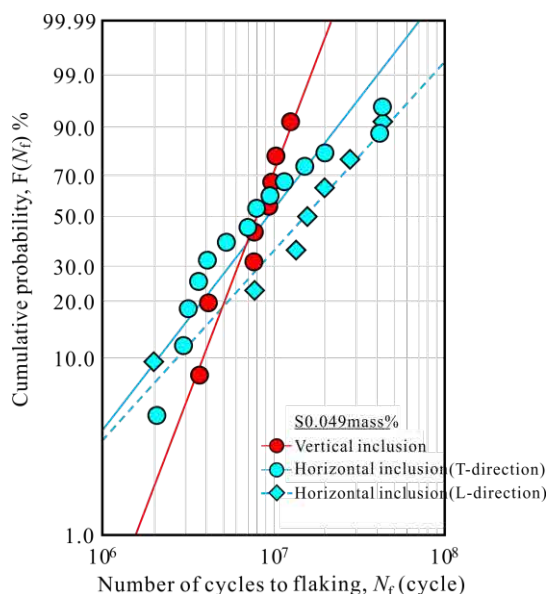


図 3. フレーキング寿命のワイブル分布

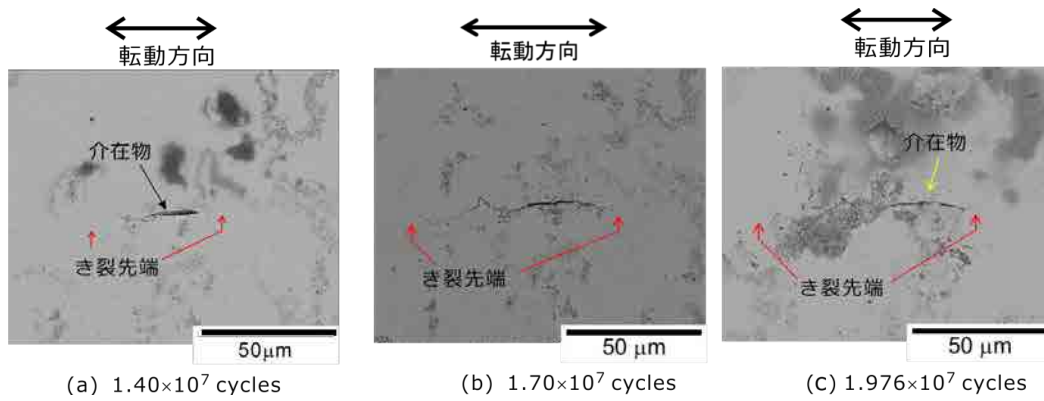


図 4. 転動面表面におけるき裂の SEM 観察結果

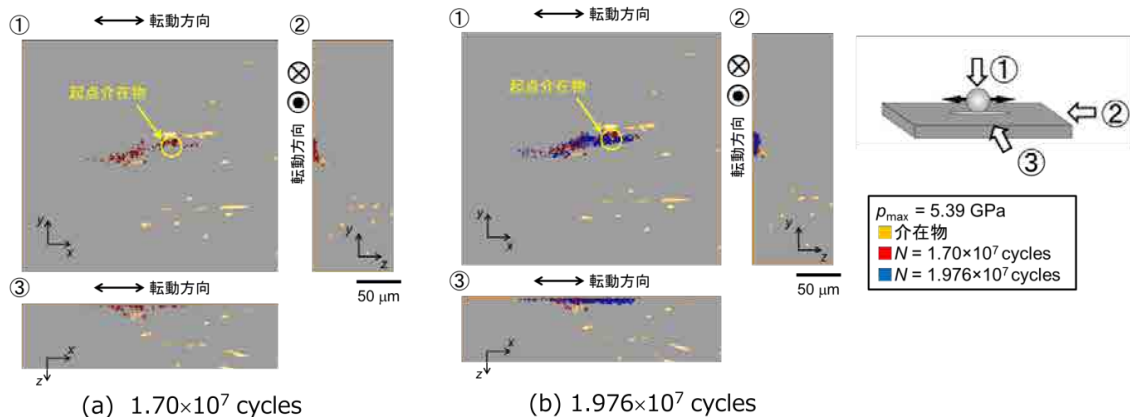


図 5. ラミノグラフィによるき裂の進展挙動観察結果

通常の有効ピクセルサイズは $0.60 \mu\text{m}$ であり、 2×2 ビニングモードは $1.20 \mu\text{m}$ となる。ラミノグラフィの回転軸の傾斜角を $\varphi=30^\circ$ とした。X 線エネルギーを 37 keV とし、 0° から 360° まで 0.5° 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、露光時間は通常モードでは 0.6 秒、 2×2 ビニングモードでは 4 秒とした。

3. 結果および考察：

3.1 L 方向材のラミノグラフィ観察結果

図 2 に示した 3 つの介在物の配向形態を有する試験片における転動疲労試験の破断繰返し数のワイブル分布を図 3 に示す。図 3 より、ワイブル分布の中央値である破壊確率 50% での繰返し数は水平 L 方向介在物が最も大きくなっていることが分かる。L 方向介在物は他の二つの介在物の配向形態と比較してフレーキング寿命が長くなる傾向がみられる。

SPring-8 での観察前に行った転動疲労試験により、L 方向材においても転動面において表面き裂が発生することが分かった。本課題実験ではき裂の内部における進展挙動を明らかにするために、き裂発生直後で中途止めして、SPring-8 に持ち込み、転動疲労試験とラミノグラフィを繰り返す観察を行った。介在物を起点としたき裂の SEM による表面観察結果を図 4 に示す。図 4(a) に示したように表面観察でき裂の発生が確認されたが、このときのラミノグラフィ観察ではき裂が検出されていなかった。さらに転動疲労試験を行うと表面においてき裂の進展がみられた。図 4(b) および(c)のき裂に対してラミノグラフィ観察を行った結果を図 5 に示す。図 5(a) より、表面のき裂長手方向のき裂長さに対して、深さ方向のき裂長さが非常に小さく、非常に浅い表面き裂であることが分かる。さらに課題実験中に転動疲労試験とラミノグラフィ観察をそれぞれ行ったところ、深さ方向のき裂がわずかに進展しており、き裂の形状は転動試験前と比較して鮮明になったが、長手方向および深さ方向への顕著なき裂進展は見られなかった(図 5(b))。今回のサンプルのように L 方向材のき裂進展寿命が T 方向材と比較して長くなった要因として、表面観察およびラミノグラフィにおいて転動疲労試験とともに介在物が小さくなっていったことから、介在物に沿ってき裂が進展した T 方向材と比較して、L 方向材では介在物が摩耗し小さくなることからき裂の進展が遅くなったことが考えられる。

3.2 酸化物系介在物を起点としたフレーキング形成機構の観察

3.1 項では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試験片について実験を行った。2017A 期に作製した、酸化物系介在物が起点となるように調整した試験片について転動疲労試験を行い、フレーキング形成機構の観察を行った。酸化物系介在物は、転動面に対して垂直な方向に配向しており、MnS 介在物の垂直介在物と同様の配向形態となっている。

酸化物系介在物を有する試験片に対して、転動疲労試験を行ったところ、表面き裂が観察された。図 6 にこのき裂の表面観察結果を示す。図 6 より、MnS の垂直介在物と同様に転動方向に対してほぼ垂直方向にき裂が進展していることが分かる。このき裂に対してラミノグラフィ撮影を行った結果を図 7 に示す。図 7 より、き裂は介在物に沿って進展していることが分かった。SPring-8 において転動疲労試験とラミノグラフィ撮影を繰り返したが、ビームタイム内で顕著なき裂の進展は見られなかった。

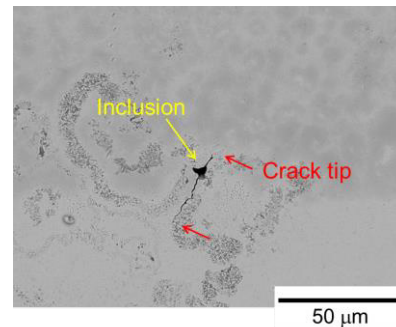


図 6. 酸化物系介在物を起点とした表面き裂

4. 今後の課題：

転動面に平行で転動方向と同方向に配向した介在物(L 方向介在物)に対して転動疲労き裂の進展挙動の観察を行い、転動方向に平行かつ転動面から垂直に介在物から進展する初期き裂の挙動について調査した。初期のき裂の進展は転動方向と垂直に配向した L 方向介在物では、介在物の摩耗現象が生じながら、転動方向にき裂が進展しており、T 方向介在物と比較してその進展速度は遅いことが分かった。引き続きき裂の進展挙動を観察し、フレーキング形成挙動を詳細に観察する予定である。新たに SPring-8 観察用の酸化物系介在物を有する試験片において転動疲労試験とラミノグラフィ観察を行ったところ、MnS 介在物と同様に転動面近傍の介在物から表面き裂が発生することが分かった。この表面き裂についても進展挙動を観察し、フレーキング形成過程を明らかにする予定である。

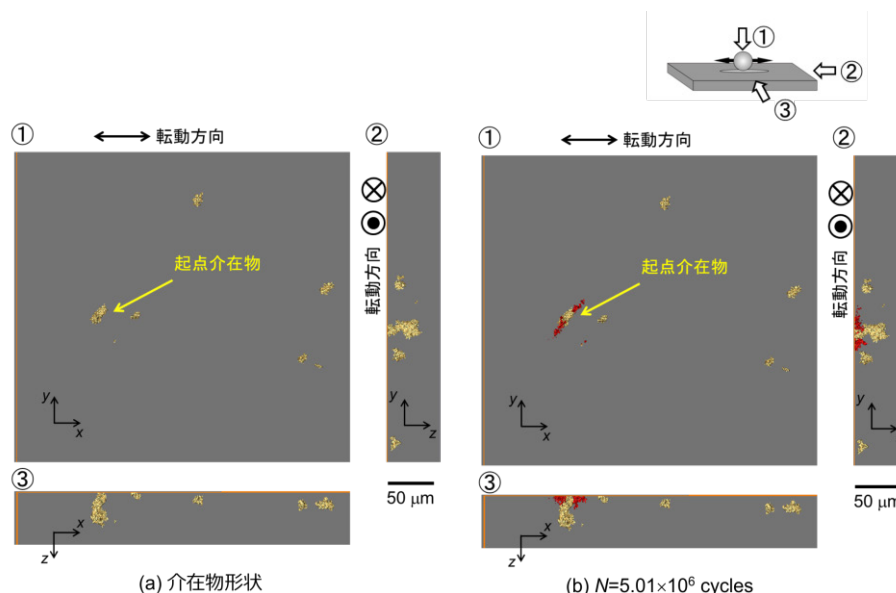


図 7. 酸化物系介在物を起点とした表面き裂のラミノグラフィ観察結果

参考文献：

- [1] 佐野雄二 他, 平成 23 年度 SPring-8 重点産業利用課題実施報告書(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), pp.207-210.
- [3] 牧野泰三 他, 平成 25 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・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 (2014), pp. 168-177.
- [6] 牧野泰三 他, 平成 26 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書 (2014A), 2014A1562.
- [7] 齋藤仁史 他, M&M2016 材料力学カンファレンス(2016), pp. 771-772.
- [8] 牧野泰三 他, 平成 28 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書 (2016B), 2016B1589.