

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のはく離前後の観察

Observation of Rolling Contact Delamination Behavior in the Material with Inclusions Oriented in Rolling Direction 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返し行った。その結果、転動面表面付近の介在物から発生したき裂は、深さ方向に進展せずに浅いき裂のまま L 方向に進展した。110 μm 程度の長さには達すると、き裂は T 方向に屈曲して進展した。このとき転動面に平行なせん断き裂は発生していないことから、せん断き裂の発生と進展は、表面き裂の進展と屈曲の後に生じていることが明らかとなった。

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。2017B 期課題実験では、介在物を起点としたき裂の発生初期における挙動の観察を行ったが、顕著なき裂進展を捉えることができなかった。そこで 2017BII 期課題実験では、引き続き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 2×2 ビニングモードがある。通常の有効ピクセルサイズは 0.60 μm であり、2×2 ビニングモードは 1.20 μm となる。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° 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

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 3 に示す。図 3(a) に示し

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.

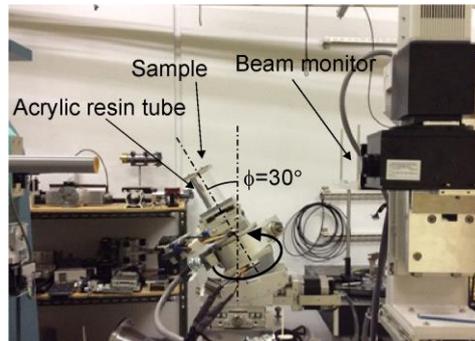


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

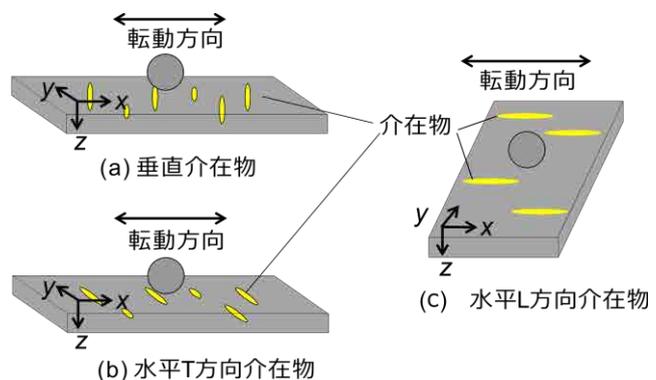


図 2. 介在物配向形態と転動疲労方式の関係

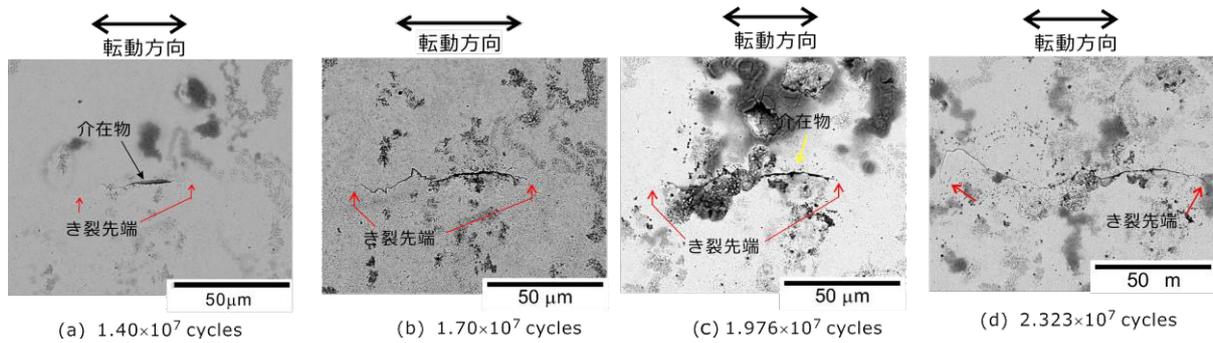


図 3. 転動面表面におけるき裂の SEM 観察結果

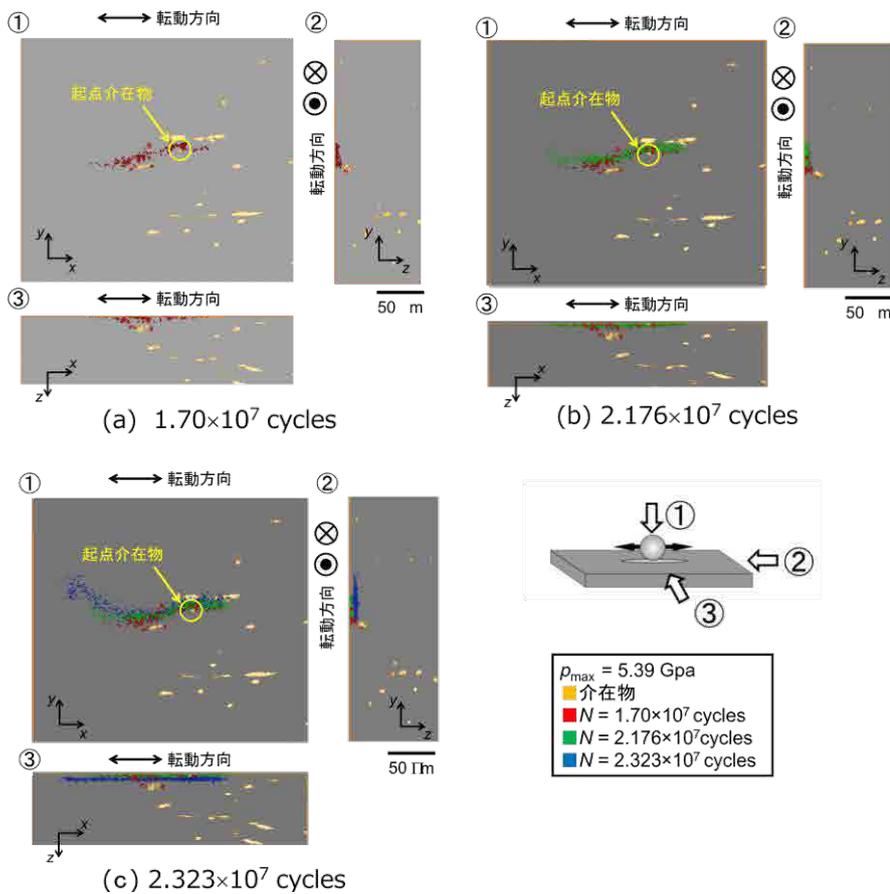


図 4. ラミノグラフィによるき裂の進展挙動観察結果

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。さらに転動疲労試験を行うと表面き裂の進展がみられ(図 3(b)~(d))、2017BII 期実験中に表面き裂の屈曲が観察された(図 3(d))。

図 3(b)~(d)の期間におけるラミノグラフィ観察によるき裂の観察結果を図 4 に示す。図 4(a)より、介在物から発生したき裂は、き裂長さに対してき裂深さが非常に小さく、非常に浅い表面き裂であることが分かる。その後、深さ方向へのき裂進展はほとんど生じておらず、表面観察結果と同様に長手方向への進展が生じている。さらに図 3(d)に示したように表面き裂が屈曲した時点において、図 4(a)および(b)と比較してき裂は深さ方向に進展していないことが明らかとなった。またフレーキング形成過程でみられる、転動面に対して平行なせん断き裂は、表面き裂の屈曲が観察された時点で発生していなかった。

これまでの観察により、フレーキング間近の時点で、表面のき裂の屈曲とともに、材料内部では転動面に平行なせん断き裂が発生・進展していることが確認されている[8][9]。これらのことか

ら L 方向介在物の場合では、次のようなき裂進展挙動を示すことが分かった。①表面き裂が介在物を起点として発生し 110 μm 程度の長さで転動方向に進展する。このとき深さ方向の進展は少ない。②き裂先端が転動方向と垂直な方向に屈曲する。③き裂は深さ方向に進展し、ある深さに達するとせん断き裂が発生する。④せん断き裂は表面に向かって進展し、表面に達するフレーキングを形成する。

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)を起点に発生したき裂の初期の進展挙動について調査した。その結果、介在物から発生したき裂は、浅いき裂のまま転動方向に進展し、110 μm 程度の長さで屈曲を示すことが分かった。さらにこのときせん断き裂は発生していないことから、き裂の屈曲後にき裂は深さ方向に進展するのに伴って平行き裂が発生するものと考えられる。以上のように、L 方向介在物を起点としたフレーキング形成過程が明らかとなった。今後は介在物形状がき裂進展に及ぼす影響について、ラミノグラフィ観察結果や数値解析をもとに分析し、転動疲労に対する長寿命化への指針を得ることを試みる。

参考文献：

- [1] 佐野雄二 他, 平成 23 年度 SPring-8 重点産業利用課題報告書(2012B), 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 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 (2014), pp. 168-177.
- [6] 牧野泰三 他, 平成 26 年度 SPring-8 重点産業化促進課題・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 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2016B), 2016B1589.
- [9] 仁科 多可志 他, M&M2017 材料力学カンファレンス(2017), pp. 516-518