

放射光 X 線ラミノグラフィによる転動方向介在物配向材における 転動疲労損傷観察

Observation of Rolling Contact Damage 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(水平 T 方向介在物)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(水平 L 方向)に対して転動疲労き裂の進展挙動観察を行った。SPring-8 での測定前の転動疲労試験の結果、水平 L 方向介在物では水平 T 方向介在物と比較してフレーキング発生寿命が長いこと、およびフレーキング前に表面き裂が観察されることなどが分かった。そこで表面き裂が発生した段階で疲労試験を途中止めた試験片についてラミノグラフィ測定を行うことにより内部の転動疲労き裂の観察を行ったところ、これまでの配向形態と同様に、転動面から深さ方向に進展する疲労き裂およびせん断型疲労き裂が発生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(水平 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。そこで本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(水平 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、水平 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 期では水平 L 方向介在物を有する試験片に対して転動疲労試験を行い、フレーキングに近いと思われる状態で試験を途中止めたサンプルに対してラミノグラフィ撮影を行い、水平 L 方向介在物における転動疲労き裂の進展挙動を把握すること

を目的とした。

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(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 つの検出要素を構成する 2×2 ビニングモードと 16 個のピクセルを用いる 4×4 ビニングモードがある。それぞれの有効ピクセルサイズは 0.74 μm および 1.48 μm となる。全スキャン測定には、4×4 ビニングモードを用いた。ラミノグラフィの装置外観図を図 1 に示す。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 4×4 ビニングモードでは 0.6 秒、2×2 ビニングモードでは 4 秒と

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.

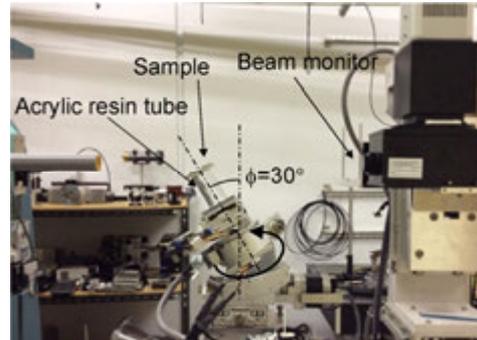


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

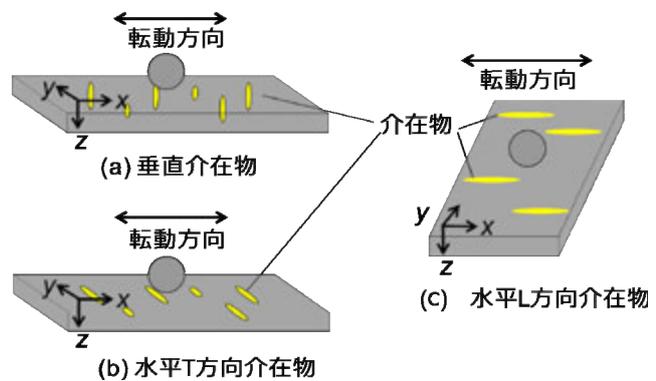


図 2. 介在物配向形態と転動疲労方式の関係

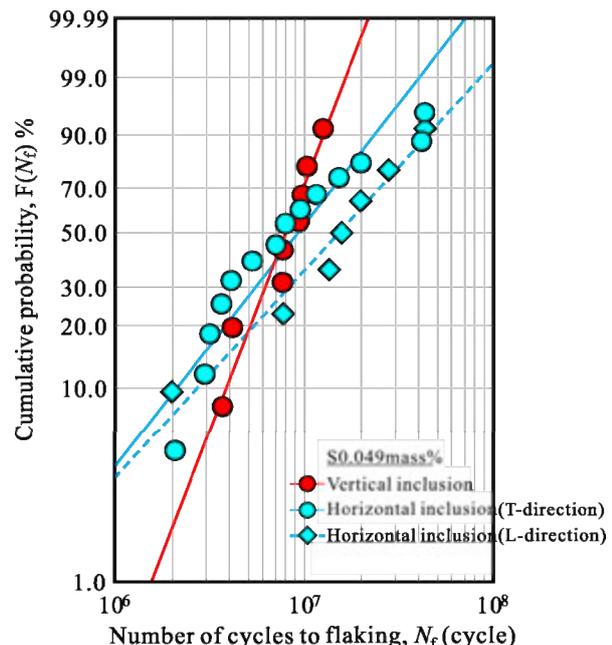


図 3. フレーキング寿命のワイブル分布

した。

3. 結果および考察：

3.1 転動疲労試験

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。また水平介在物では垂直介在物と比較してフレーキング寿命のばらつきが大きい。水平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ことが分かった。

3.2 ラミノグラフィ観察結果

水平L方向介在物における転動面での表面観察結果を図4に示す。水平T方向介在物と同様に複数の表面き裂が確認された。ただし、垂直介在物および水平T方向介在物では転動方向に対して直角な方向に進展していたのに対して、水平L方向介在物では転動方向と同じ方向にき裂が進展していた。転動方向に進展したき裂は、転動方向と直角方向に屈曲していた。また、この表面き裂を含んだフレーキングを形成することが観察された。そこで表面き裂が発生した段階で転動疲労試験を中途止め($N=3.52 \times 10^7$ cycles)したサンプルを用意し、ラミノグラフィ測定を行った。中途止め繰返し数としては、予想破断寿命から転動疲労試験後期のものを選んだ。このサンプルにおける表面き裂のラミノグラフィ撮影結果の一例を図5に示す。図5より、転動方向に配向する介在物に沿ってき裂が発生しており、yz切断面を示した図5(d)よりこのき裂は深さ方向に進展していることが分かる。転動面に垂直かつ深さ方向に進展するき裂(垂直き裂)は、これまでの垂直介在物や水平T方向介在物においても観察されている。ただし、水平L方向介在物ではき裂の進展方向が転動方向と同じである点について、他の介在物とは異なっていた。さらにより深い位置までき裂が進展した箇所(図5(e))では、転動面と平行なせん断型き裂が発生しているように見られる。水平T方向介在物と比較して、水平L方向介在物ではフレーキング寿命が長い傾向にあった。介在物の配向形態が、深さ方向へ進展するき裂の発生や成長に影響を与えた可能性が考えられる。

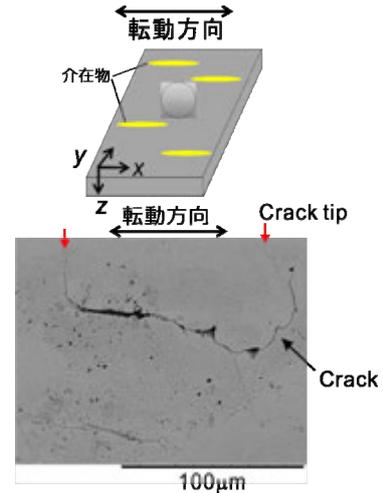


図4. 転動痕上の表面き裂
($N=3.52 \times 10^7$ cycles)

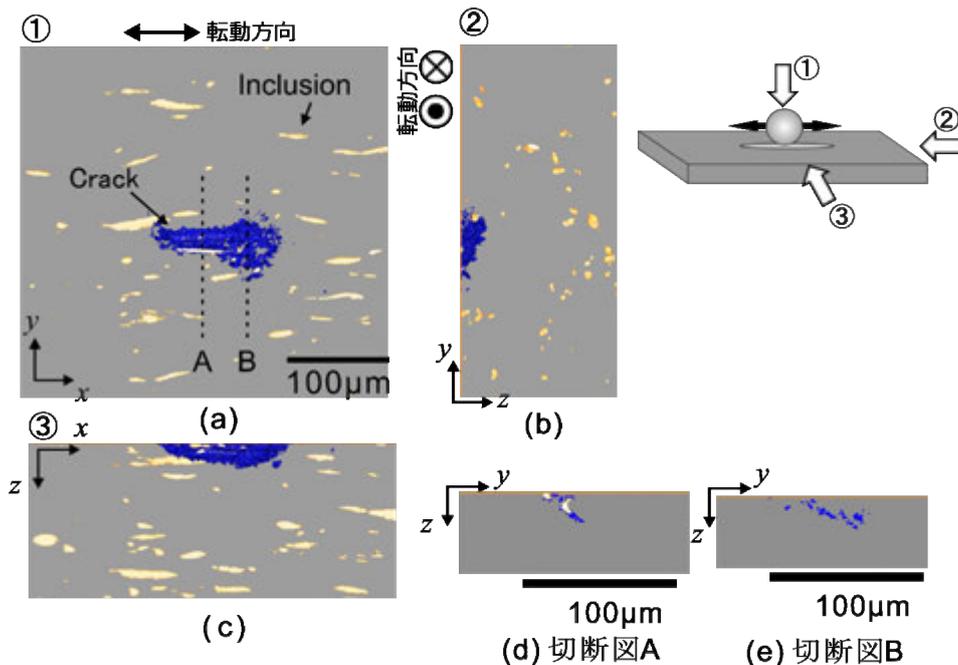


図5.

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(水平 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った。その結果、これまで検討した介在物形態の場合と同様に、まず転動面付近の介在物から深さ方向に進展するき裂(垂直き裂)が発生することが明らかとなった。このき裂は他の配向形態の介在物とは異なり、発生直後は転動方向に進展していた。せん断型き裂も見られたが、このき裂がせん断型き裂として進展するかについてはさらにき裂を進展させた時系列での検討が必要である。水平 L 方向介在物では、水平 T 方向介在物や垂直介在物と比較してフレーキング寿命が長い傾向が見られた。これは介在物の配向形態が垂直き裂の発生や進展挙動に影響を与えたことによるものと考えられる。課題実験ではこれらの観察の他に、転動疲労試験前の試験片に対して介在物全数評価を行っており、転動痕における介在物分布を取得している。これらの試験片を用いてフレーキングの起点となる介在物を推定することを試みる。この介在物について転動き裂の発生・進展の詳細な時系列観察を行う予定である。

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 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.