

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 転動疲労損傷の発達過程と酸化物系介在物の分散形態の観察 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 and 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(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(L 方向)に対して転動疲労き裂の進展挙動観察を行った。水平 L 方向材に対して、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についてラミノグラフィ測定を行ったところ、表面においては介在物から転動方向に進展したき裂とその後転動方向に垂直な方向に屈曲したき裂が確認された時点において、試験片内部には転動面に平行なせん断型疲労き裂が発生していることが明らかとなった。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、酸化物系介在物を意図的に分散させて材料を試作した。

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)

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[8]。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、転動疲労に影響を与え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2017A期ではL方向材に対して、き裂発生からフレーキングに至るまでのき裂進展過程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、酸化物系介在物を意図的に分散させて材料を試作した。この酸化物系介在物の分散形態の観察を行った。

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1mm、幅10mm、長さ24mm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6.0mmのセラミック球を用いており、ボールの摺動距離は3mm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5.39GPa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 μ mおよび1.48 μ mとなる。全スキニング測定には、4×4ビニングモード

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.

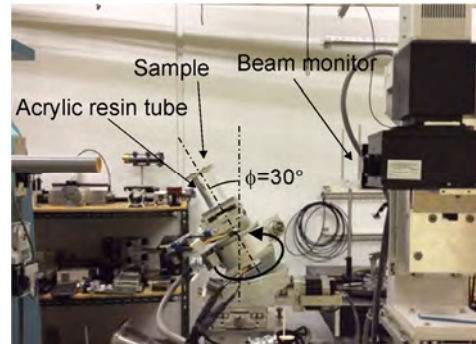


図1. ラミノグラフィ測定装置の外観

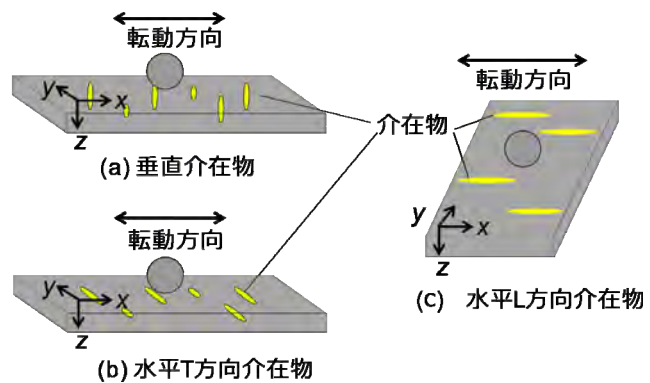


図2. 介在物配向形態と転動疲労方式の関係

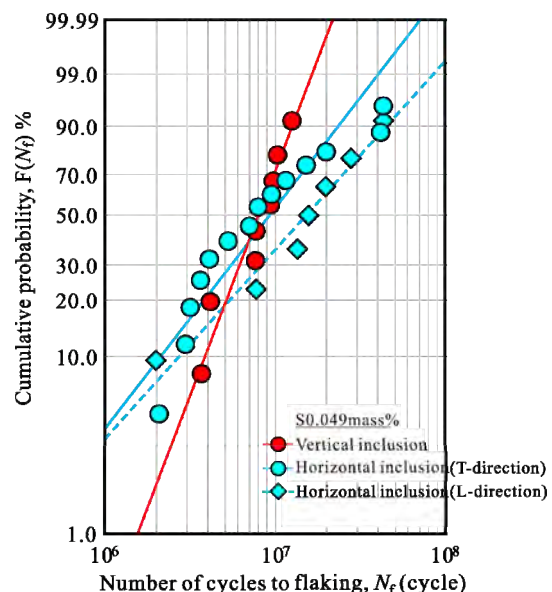


図3. フレーキング寿命のワイブル分布

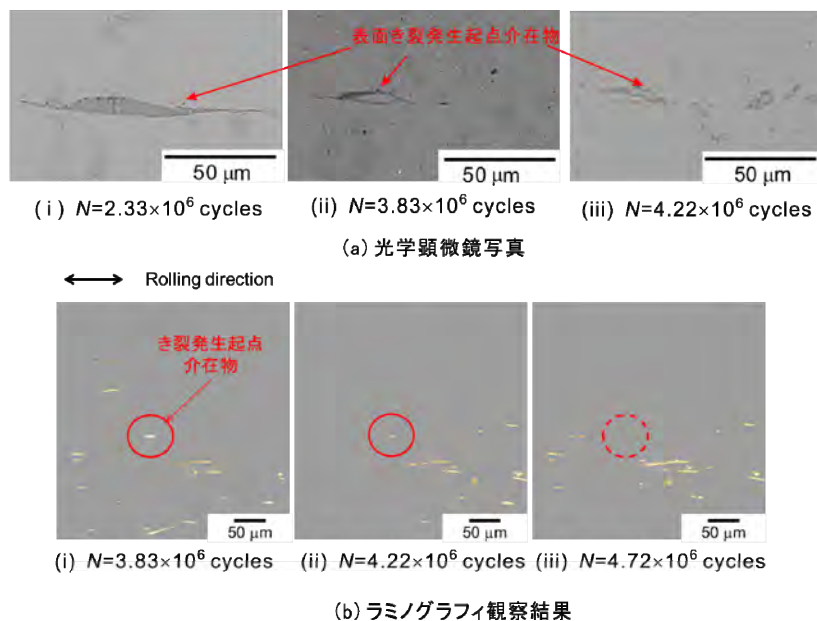


図 4. 表面介在物の摩耗過程のラミノグラフィおよび光学観察結果

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 37keV 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 300mm 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

SPring-8 での観察前に行った転動疲労試験により、水平 L 方向介在物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。2016B 期ではフレーキング直前と思われるき裂の観察を行った結果、その他の平行形態の介在物と同様に介在物からき裂が発生し、この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[8]。本課題実験ではき裂の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。表面き裂を有する介在物の転動疲労試験における時系列変化を図 4 に示す。図 4 に示したように、表面観察ではき裂の発生が確認されるのに対して、ラミノグラフィ観察ではき裂が検出されていなかった。さらに繰返し負荷とともに表面観察およびラミノグラフィ観察結果ともに介在物の寸法が小さくなっており、介在物が摩耗によって減少している様子が観察された。他の介在物についても観察を行ったところ、図 5 に示すように、初期の介在物およびき裂が繰返し数とともに減少していくことが確認された。表面き裂と思われた箇所も負荷の繰返しとともに消えたことから、介在物の一部がき裂のように見えたことやき裂が浅かったため摩耗により消滅したことなどが考えられる。T 方向材では L 方向材と比較してフレーキング寿命が長い傾向にあることから、介在物の配向形態によりき裂発生および進展寿命が長いこと、さらに介在物の摩耗が生じることなどが、フレーキング寿命に影響を与えている可能性があるものと考えられる。

3.3 酸化物系介在物の分布状態

次に酸化物系介在物を有するサンプルにおける介在物の分布形態を調べた。ラミノグラフィ観察結果を図 6 に示す。図 6 より、MnS 介在物と比較して細長い形状を示しており、撮影範囲全体に分布していることが分かる。作製したインゴットから採取する位置を変えたサンプルに対して観察

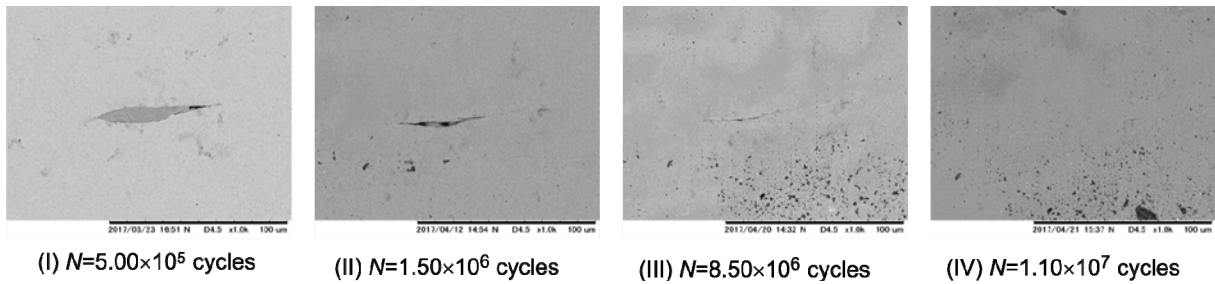


図 5. 介在物の転動疲労試験過程の変化

を行った結果、一部介在物の分布が少ないものが見られた。これらの結果より、分布形態に課題があるものの、酸化物系介在物を起点とした転動疲労き裂発生を観察できる可能性がある材料を作成できていることが分かった。

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。その結果、転動方向と平行に配向した L 方向介在物では転動疲労試験中に介在物の摩耗が起きていることが明らかとなった。転動方向と垂直に配向した T 方向介在物と比較して L 方向介在物では、転動疲労寿命が延びる傾向にあるため、介在物の摩耗現象が転動疲労寿命に影響を与えている可能性があることが分かった。今後は L 方向介在物において顕著に摩耗の影響が生じるメカニズムの解明や、摩耗も考慮したフレーキングに至る L 方向介在物形態の特徴について考察する予定である。さらに新たに SPring-8 観察用の酸化物系介在物を有するサンプルの試作を行った。一部介在物の少ない領域が見られたが、酸化物系介在物を予定通り導入することができることが分かった。酸化物系介在物サンプルの作成方向について改良を行う予定である。

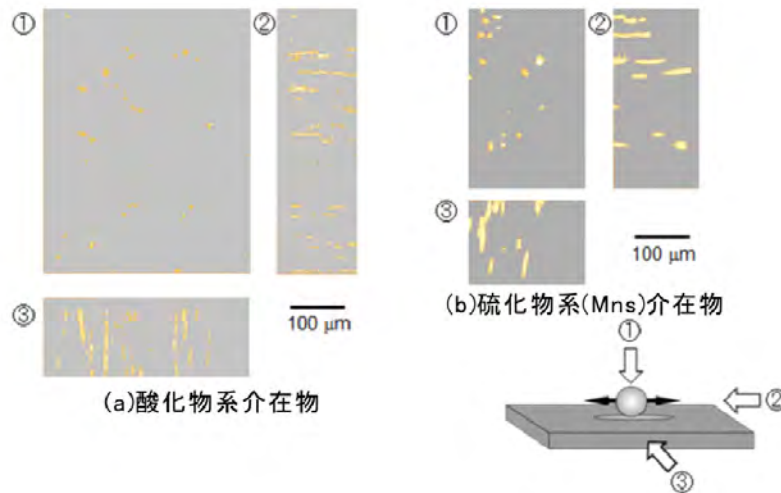


図 6. 酸化物系介在物の分布形態

参考文献：

- [1] 佐野雄二 他, 2011B 期 重点産業利用課題報告書(2012), 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, 2013A 期 重点産業利用課題報告書(2013), 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, 2014A 期 重点産業利用課題報告書(2015), 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 年度産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2016B),2016B1589.