

放射光 X 線ラミノグラフィによる形態制御介在物分散材における 転動疲労損傷観察

Observation of Rolling Contact Fatigue Damage in the Material with Dispersive Shape-controlled Inclusions 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^c
Taizo Makino^a, Yutaka Neishi^a, Yoshikazu Nakai^b, Daiki Shiozawa^b and Shoichi Kikuchi^c

^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, ^c静岡大学工学部
^aNippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, ^bKobe University, ^cShizuoka 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(S方向材)や転動面に水平に配向する介在物を有する材料(T方向材/L方向材)について、き裂の発生および進展挙動を観察した。本研究では介在物の投影形状による応力集中を緩和する、球状化処理を施した介在物について、き裂の発生および進展挙動に関する調査を行った。本課題実験では球状化形態制御を行った材料の介在物分布形態、および表面に観察されたき裂の分布形態の観察を行った。作製した試験片は、従来の延伸介在物と比較して球状化された介在物形態を有していることが確認された。また表面き裂は表面と垂直方向に介在物に沿って進展しており、材料内部で転動面に平行な方向に分岐し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(S方向介在物)および、転動面に平行に配向する円柱状の介在物(T方向：転動方向に垂直に配向, L方向：転動方向に平行に配向)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[8]-[9]。この原因として、はく離形成過程は転動方向への介在物の投影形状と応力状態によって決まる可能性が考えられた。そこで投影形状による応力集中を緩和する球状化処理を施した介在物について、き裂発生および進展挙動の観察を行い、高強度化を達成する介在物制御指針を得ることを目的とした。本課題実験では、介在物の球状化形態制御を行った材料(球状化介在物材)について硫化物介在物の分散形態の評価およびそれらの材料における転動疲労試験によるはく離損傷周りのき裂分布の3次元観察を行った。

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.

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 の平板形状である。

介在物の配向形態としては、球状化処理を施しているが、熱間鍛伸により介在物は、図 2(a) に示したように、転動面に対して垂直方向に介在物が長い形状 (S 方向配向) となるように切り出している。

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 ビニングモードがあり、この時の有効ピクセルサイズは 0.60 μm であり、4×4 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 2×2 ビニングモードでは 0.6 秒、4×4 ビニングモードでは 4 秒とした。

3. 結果および考察

球状化介在物材に対して、転動疲労試験を行ったところ、表面き裂の発生が観察された。表面き裂の走査型電子顕微鏡観察結果を図 3 に示す。図 3 より転動方向に対して垂直な方向にき裂が発生し、進展していることが分かった。図 3 に示した試験片とは別の試験片では、表面き裂が観察された箇所において、その後はく離の発生が確認されたことから表面に観察されたき裂はく離の形成と関連するものと考えられる。

球状化介在物の分布形態、および表面き裂の観察を行った結果を図 4 に示す。図 4 は図 3(c) の表面き裂についてラミノグラフィ観察を行った結果であり、図 4(a) では介在物を黄色で、図 4(b) ではき裂部を赤色で示している。図 4(a) より、介在物はこれまでの延伸介在物と比較して介在物

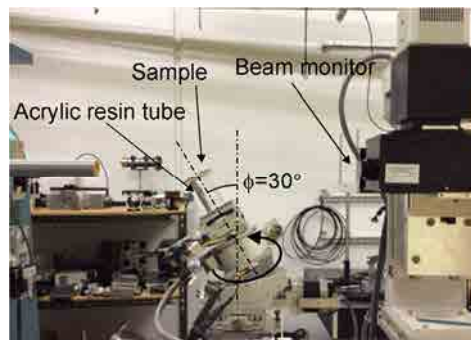


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

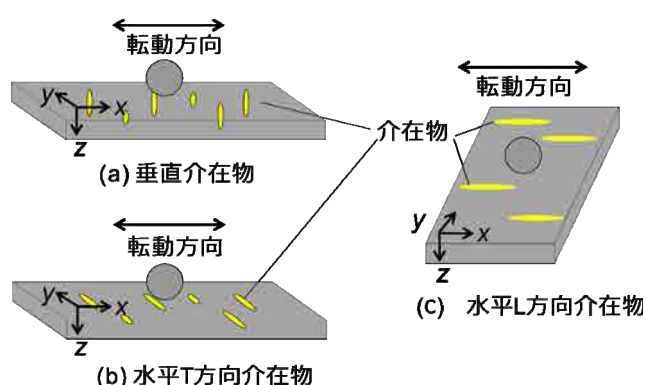
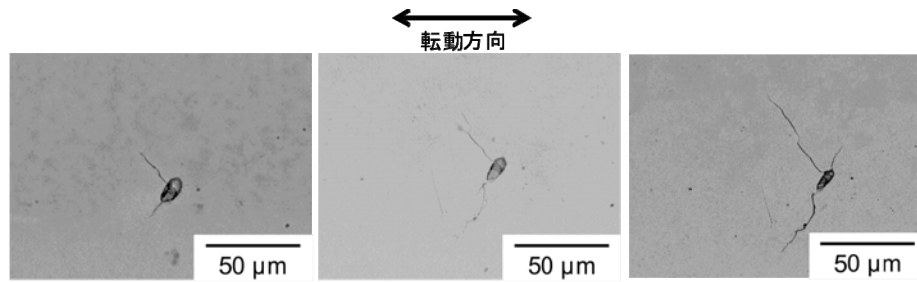
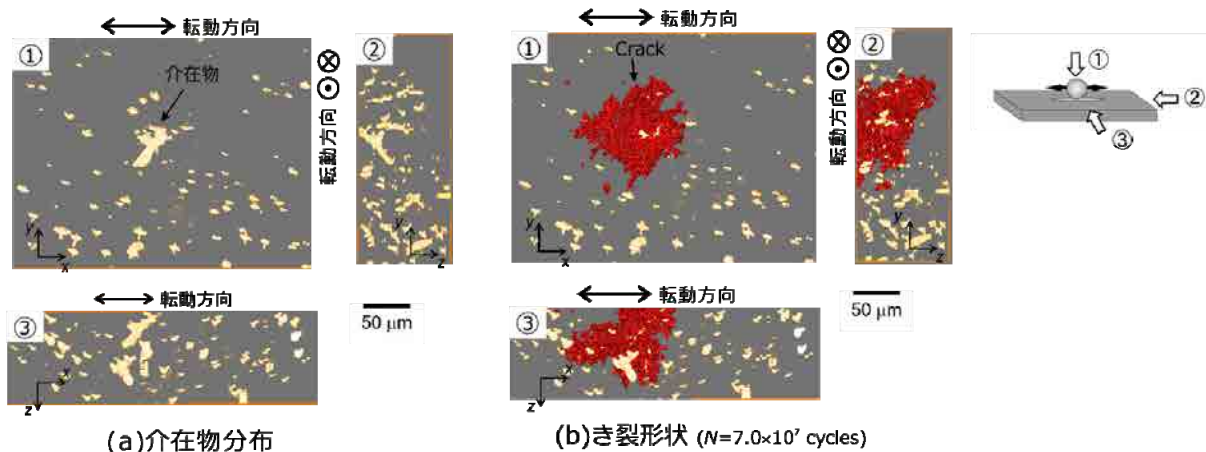


図 2. 介在物配向形態と転動疲労方式の関係



(a) $N = 4.00 \times 10^7$ cycles (b) $N = 6.00 \times 10^6$ cycles (c) $N = 7.00 \times 10^6$ cycles

図 3. 転動面表面におけるき裂の SEM 観察結果



(a) 介在物分布

(b) き裂形状 ($N = 7.0 \times 10^7$ cycles)

図 4. ラミノグラフィによるき裂形状の観察結果

の長さが短くなっており、介在物の直径が大きくなっていることが分かる。また表面き裂の形状を示した図 4(b)より、き裂は転動面に対して垂直方向に進展した後、内部ではき裂が分岐して転動面に平行に進展していることが分かる。球状化処理を施したことによって介在物の長さが短くなった場合においても、延伸介在物と同様に、介在物に沿った転動面に垂直なき裂が発生・進展した後に転動面に平行なき裂が発生するという、はく離形成挙動を示すことが明らかとなった。

4. 今後の課題：

介在物形状の制御による軸受鋼の高強度化への指針を得るために、球状化処理の効果を検証する。本課題実験では、作成した球状化介在物の配向形態および球状化介在物材において観察された表面き裂の形状をラミノグラフィにより観察した。その結果、球状化された介在物を確認し、その3次元形状および分布形態を得ることができた。さらに球状化介在物から発生したき裂は、これまでの延伸介在物に発生したき裂と同様の形状を示していることが分かった。今後は、はく離の起点となる介在物の形状および寸法について定量的に評価し、球状化による長寿命化の効果について検討を行う予定である。

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 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.
- [9] 仁科 多可志 他, M&M2017 材料力学カンファレンス(2017), pp. 516-518