

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 転動疲労進展過程観察

Observation of Rolling Contact Fatigue Crack Propagation Process 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, Shoichi Kikuchi^c

^a 日本製鉄(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 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について、S方向およびT方向に配向した介在物から発生したき裂がはく離を形成するまでの過程を4D観察することを試みた。疲労試験前の介在物分布形態の把握を行うことで効率的にラミノグラフィ撮影によるき裂進展を評価することができた。また一連の観察を通して、介在物の分布形態が転動疲労寿命に及ぼす影響に関する知見が得られた。

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ている。2018A~2018B期には球状化処理を行った試験片(球状化介在物材)において、作成した材料の介在物の配向形態を調べた。さらにS方向に配向した球状化介在物材試験片に対して転動疲労試験を行い、フレーキング部および表面き裂が観察された箇所についてラミノグラフィ観察によってき裂の内部分布を調べている[10]。2019A期課題実験では、S方向の球状化介在物から発生したき裂進展の観察に加えて、T方向材についてもき裂の発生挙動について調査を行った。

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 1 mm、幅 10 mm、長さ 24 mm の平板形状である。

S 方向に配向した円柱状介在物 (延伸介在物) および本課題実験で用いた球状化介在物のラミノグラフィ撮影結果を図 2 に示す。図 2 に示したように、介在物の長さが短い介在物が多いが、介在物が鍛伸方向に接続しているものも見られた。配向形態としては、図 2(a) に示したように、熱間鍛伸により介在物が転動面に対して垂直方向に分布する (S 方向配向) ように切り出している。また T 方向配向では、介在物が転動面に水平に配向するように切り出して、転動方向に対して介在物の配向が垂直になるように試験機に取り付けた。

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。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。

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.

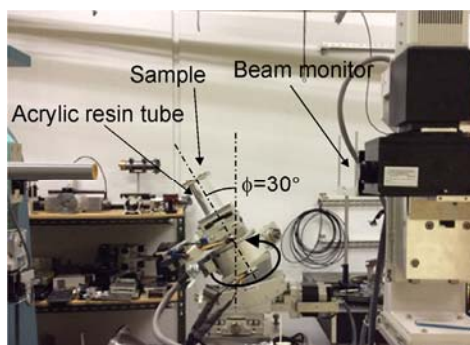


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

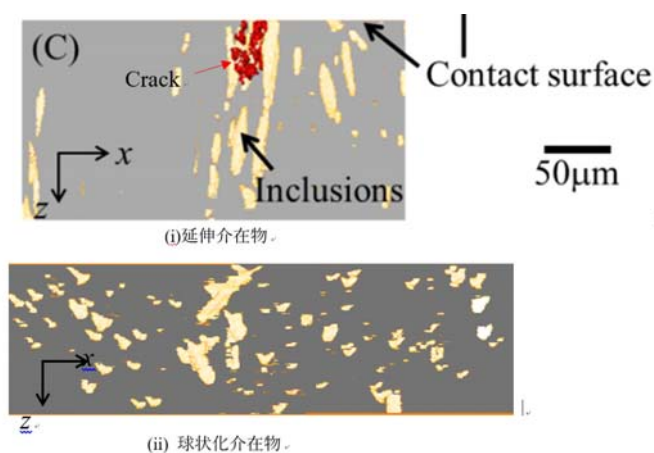
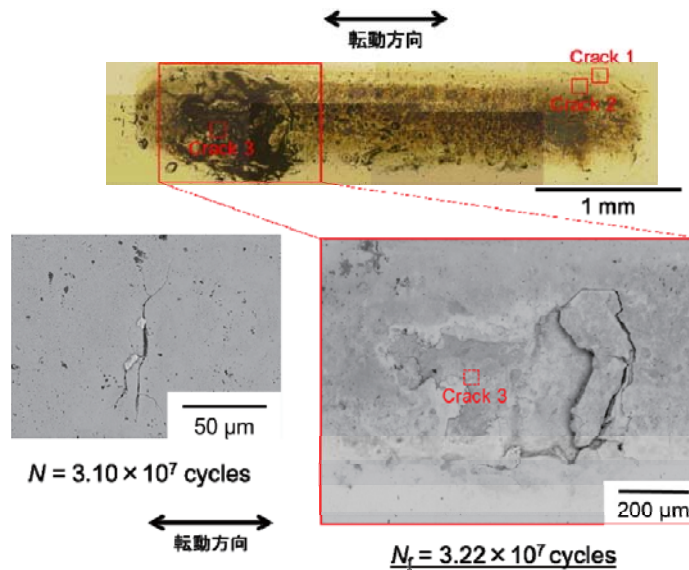
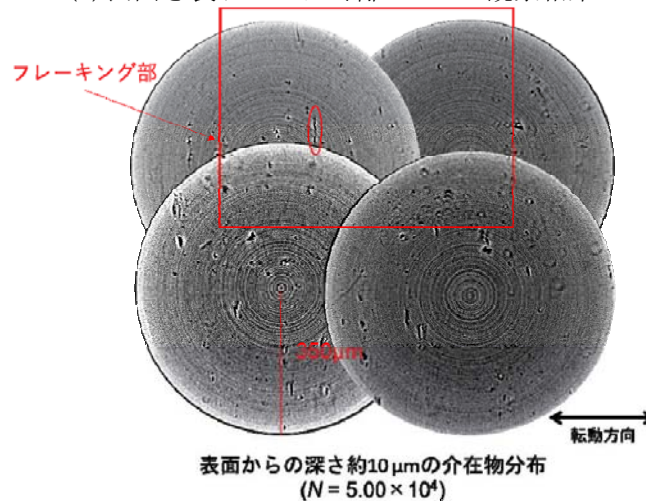


図 2. 延伸介在物と球状化介在物の配向形態の違い



(a) 表面き裂およびはく離の SEM 観察結果



(b) 転動痕直下の介在物分布

図 3. はく離の起点となった介在物および介在物からの表面き裂

3. 結果および考察

2018B 期において、転動疲労試験前のサンプルについて転動試験によるボールの軌道上すべての範囲についてラミノグラフィ撮影を行い、あらかじめ表面から $150 \mu\text{m}$ の深さにわたって介在物分布を取得した。その後転動疲労試験を行い、表面観察によって転動面上のき裂の発生を確認し、初期き裂と思われる段階で疲労試験を中断した。このき裂について、転動疲労試験とラミノグラフィ撮影を繰り返しながら進展挙動の 3 次元観察を行った。転動痕の表面観察結果およびき裂およびはく離部の SEM 観察結果を図 3(a) に示す。課題実験中の転動疲労試験により $N_f=3.22 \times 10^7$ cycles で図 3(a) 中の Crack 3 からのはく離が生じた。Crack 3 は、今回の実験でのラミノグラフィ観察の範囲外であったため、今回の実験では転動疲労き裂の内部進展挙動を捉えることができなかった。一方で、はく離の起点となった介在物は、図 3(b) に示したように、事前の分布測定から特定することができた。はく離の起点となる介在物形状の形態について従来の延伸介在物との比較を行った結果を図 4 に示す。図 4 は表面き裂が発生した介在物の幅および厚さをプロットしており、その中ではく離の起点となった介在物に * 印をつけている。これまでの延伸介在物を有するサンプルにおける転動試験では、表面き裂は転動面に近い深さ位置に存在する介在物から表面き裂が発生し、その中でも比較的大きな幅を有する介在物からはく離が生じていた。

図 4 より、フレーキングの起点となった球状化介在物と同様の寸法を有する介在物は、延伸介在物サンプルにおいても存在し、表面き裂が発生していることが分かる。球状化介在物を有する

試験片では、延伸介在物を有する試験片よりもはく離寿命が長いこと、さらに表面き裂の確認からはく離発生までの寿命は両試験片でほぼ同等であることから、介在物から表面き裂が発生し、この表面き裂がある程度の大きさまでの寿命が、はく離寿命を支配していることが考えられる。表面き裂からはく離形成の過程を捉え、さらに表面き裂およびはく離の起点となる介在物形態の情報を集めることにより、転動疲労の高寿命化に寄与する介在物の形態の影響を定量的に評価できるものと考えられる。

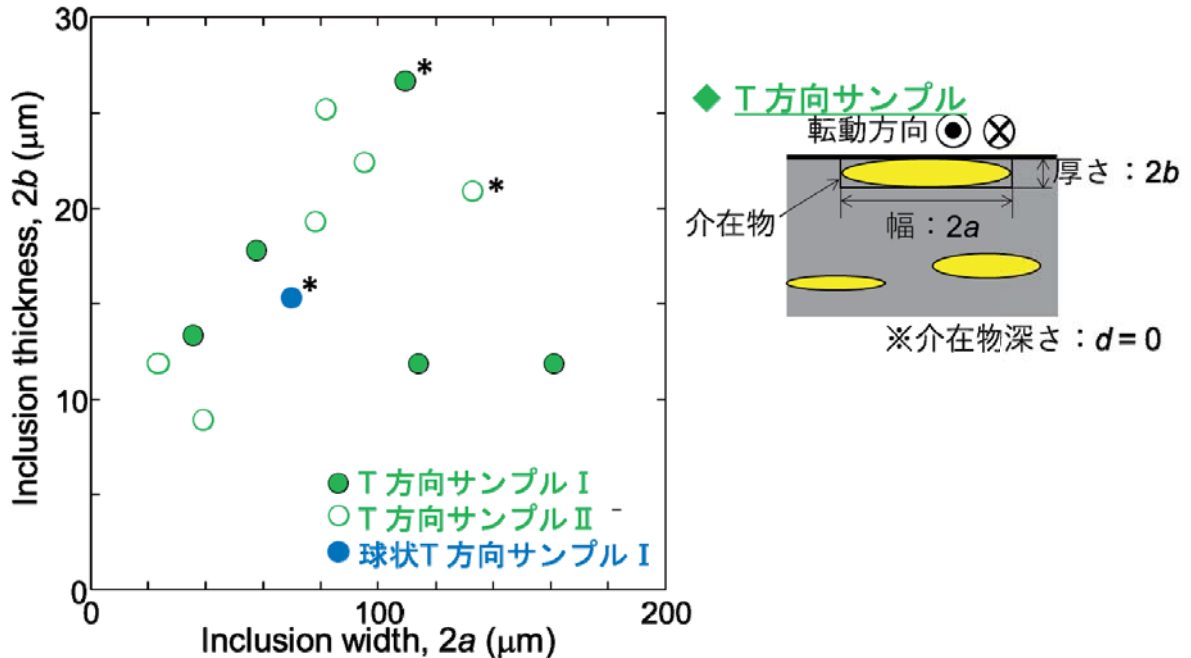


図4. 表面き裂およびはく離の起点となった介在物形態

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、球状化処理の効果とそのメカニズムに関する検討を行った。本課題実験では、転動疲労試験前の転動痕の全領域における介在物の分布形態の把握、その後の転動疲労試験、および転動疲労き裂の進展挙動の観察を通して、転動疲労破壊の起点となる球状化介在物材の3次元的な形状の特徴と、介在物から発生したき裂の進展挙動を把握することができた。これらから転動疲労の高寿命化に対する介在物形態に関する知見を得ることができた。さらに表面き裂およびはく離の起点となる介在物の形状および寸法についての情報を整理し、球状化による長寿命化の効果の定量的評価を行う予定である。

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 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, 2016B 期 産業利用課題報告書(2017), 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.
- [10] 倉橋将紀 他, 日本材料学会第 68 期学術講演会講演論文集, (2019), pp.75-76.