

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 転動疲労寿命とはく離起点介在物の関係評価

Relationship between flaking lifetime and origin inclusion 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 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の観察を行ったところ、球状化熱処理を施した材料においても転動表面から発生したき裂からフレーキングが発生することが分かった。

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)

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した。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 から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]。2019B 期課題実験では、2019A 期からは、T 方向材についてもき裂の発生および進展挙動について観察を行った。本課題実験では L 方向材における疲労き裂の進展挙動についてラミノグラフィ観察を行った結果について報告する。

実験：

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(i) 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。L 方向材では、T 方向材と同様に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平行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。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。

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($\times 10$) 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 \times 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 \times 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 \times 2 ビニングモードでは 0.6 s、4 \times 4 ビニングモードでは 4 s 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.

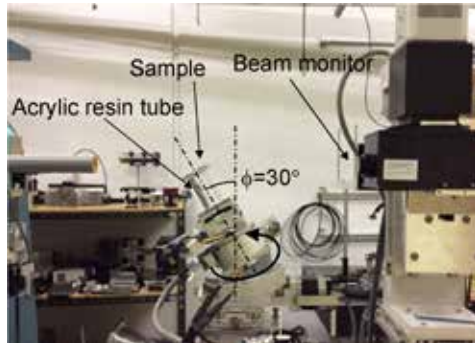


図 1 ラミノグラフィ測定装置の外観

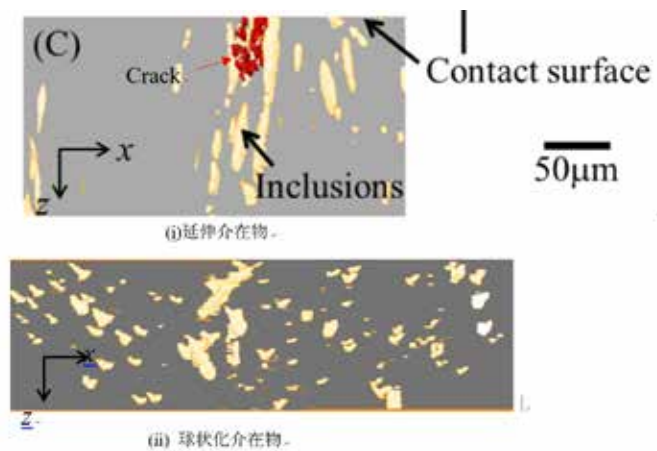


図 2 延伸介在物と球状化介在物の配向形態の違い

図 2(i) 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。L 方向材では、T 方向材と同様に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平行になるように試験機に取り付けた。

結果および考察

表面観察によって転動面上のき裂の発生を確認した段階で SPring-8 にサンプルを持ち込み、ビームラインの側で転動疲労試験とラミノグラフィ撮影を繰返しながら進展挙動の 3 次元観察を行った。また疲労試験前のサンプルを転動痕下の全領域をあらかじめラミノグラフィ撮影を行い、介在物分布を取得した。このサンプルに対して転動疲労試験を行うことによって、表面観察からフレーキングの起点となる介在物を特定し、フレーキングの原因となった要因について調査した。

L 方向材において、表面でき裂が確認された箇所をラミノグラフィ撮影した結果を図 3 に示す。繰返し数 $N=1.678 \times 10^7$ cycles における表面観察結果より、介在物から発生したき裂が屈曲していることが分かる。延伸介在物や球状化サンプルにおける疲労試験では、表面き裂が観察された介在物を起点としてフレーキングが生じることが確認された。また図 1(b)より、 $N=1.68 \times 10^7$ cycles でのラミノグラフィ観察結果から、屈曲したき裂の先に介在物が存在しており、それぞれの介在物に発生したき裂および屈曲したき裂は非常に浅いことが分かる。 $N=1.35 \times 10^7$ cycles から $N=1.68 \times 10^7$ cycles までラミノグラフィ撮影によるき裂進展挙動観察を行ったが、き裂の進展は確認できなかった。このように球状化して介在物が密集化した場合に、き裂の進展がどのように生じるのかについては、さらに検討する必要がある。

転動疲労試験結果に対してワイブル解析を行った結果を図 4 に示す。この図では未破断のサンプルについては、解析時の繰返し数を用いてワイブル解析を行い、矢印をつけて表記している。図 4 より、いずれの延伸方向材においても、球状化処理によって、延伸介在物と比較して疲労寿命が長くなっており、T 方向および L 方向材では、S 方向材と比較して長寿命化の効果が大きいことが分かる。図 1 で示した球状化介在物の形状および分布形態が、延伸介在物よりもき裂発生と進展を抑制したことにより、フレーキングまでの疲労寿命が長くなったことが考えられる。

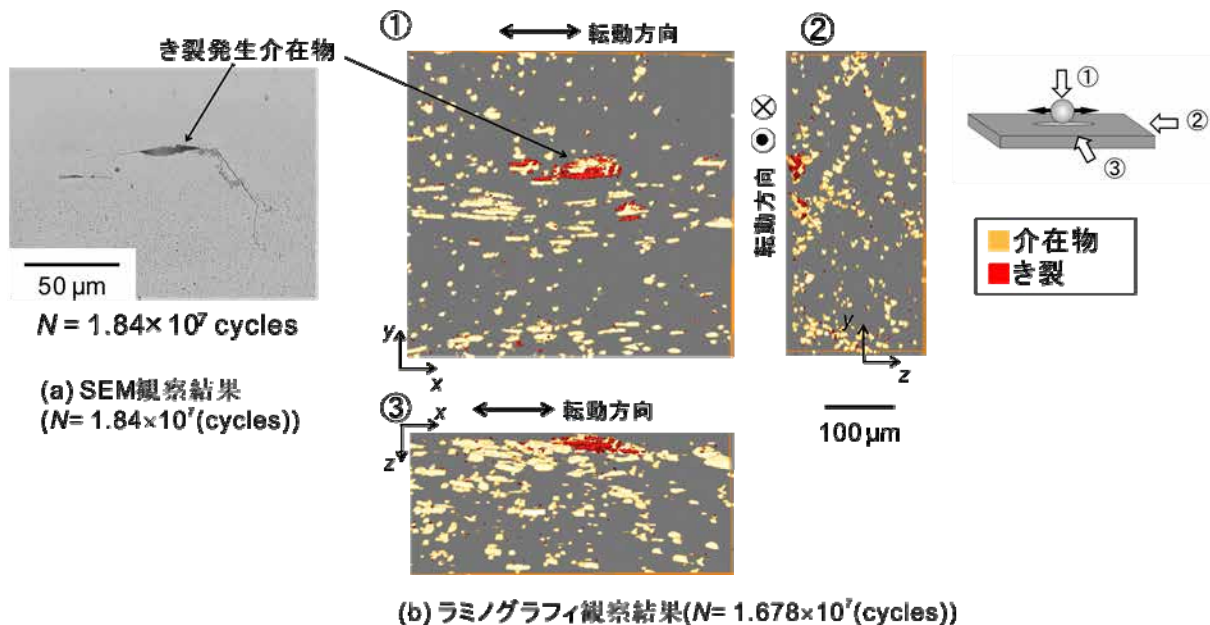


図 3 表面観察およびラミノグラフィ撮影による L 方向材におけるき裂進展挙動の観察結果

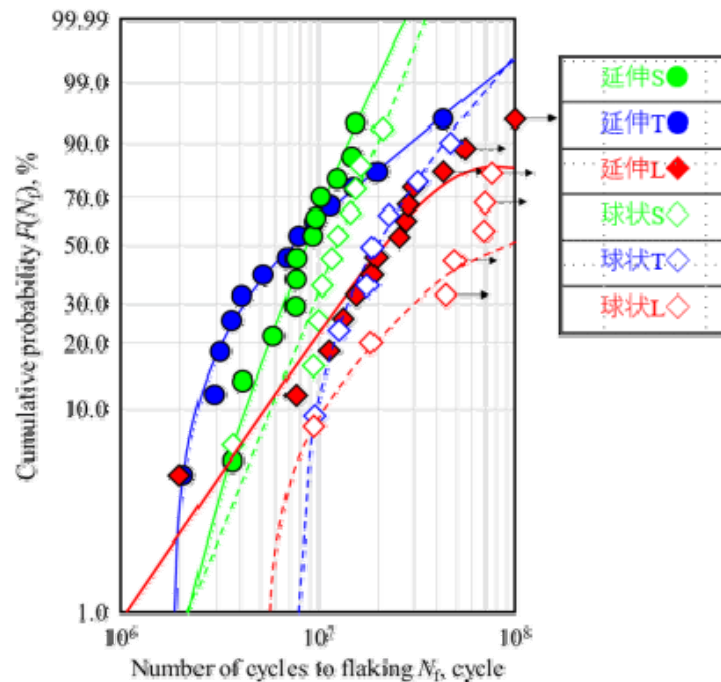


図4 延伸および球状化試験片の転動疲労試験に対するワイブル分布によるフレーキング寿命評価

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、転動疲労破壊の起点となる球状化介在物材の3次元的な形態と進展挙動の一部を得ることができた。転動痕下の介在物分布を取得したサンプルをフレーキングさせる転動疲労試験を行うことによって、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データを増やすことによって、球状化による長寿命化の効果について検証を行う予定である。

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.