

放射光 X 線ラミノグラフィによる水平方向介在物配向材における 転動疲労はく離起点介在物の特定

－はく離の起点となる介在物の形状と位置－

Identification of Inclusion Originating Flaking in the Material with Horizontal Inclusion Orientation by SR X-ray Laminography － Morphology and Location of the Inclusion －

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）や転動面に水平な方向かつ摺動方向に直角に配向する介在物（水平介在物）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、介在物全数形状・分布評価を適用した。本手法ではまず、疲労試験前にラミノグラフィで摺動痕にわたってスキヤニング測定を行うことで、全ての介在物形状および分布を把握する。その後疲労試験を実施することで、表面き裂が発生する介在物やフレーキングの起点となった介在物の特徴について検討することが可能となる。本手法を用いてフレーキングの起点となった介在物を特定し、その介在物の位置及び形状を評価するとともに、事前に介在物全数形状・分布評価を行った試験片中のフレーキングの起点となる介在物を推定して、フレーキング発生の初期過程を観察することに成功した。

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。2015A および 2015B 期では、転動面に平行に配向する円柱状の介在物（水平介在物）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。実際のベアリングでは、転動球の転動方向に対して、この水平介在物と同じ配向形態をとることが多い。水平介在物の試験片ではより複数の介在物からき裂が発生するが、発生してもき裂進展が停留するなど、き裂ごとに進展速度が大きく異なることが明らかとなりつつある。そこで介在物全数形状・分布評価による、はく離形成に及ぼす介在物形状の影響を調べることを試みた。本手法ではまず、疲労試験前にラミノグラフィで摺動痕にわたってスキヤニング測定を行うことで、全ての介在物分布を把握する。その後疲労試験を実施し、はく離やき裂が発生した位置とイメージングによる介在物分布を照らし合わせることにより、表面き裂が発生する介在物やはく離の起点となった介在物の特徴について検討する。2015B 期に介在物全数評価を行った試験片について転動疲労試験を

行った結果, はく離の起点となる介在物を特定することができた. 本課題実験でははく離に至る介在物の特徴を詳細に検討するため, 介在物全数評価によりはく離の起点となると推定した介在物に対して, 小型転動疲労試験機とラミノグラフィを組み合わせた転動疲労き裂の進展挙動観察を適用し, き裂発生からはく離に至る過程を従来よりも詳細に観察することを試みた.

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. さらに熱間鍛伸方向に対して垂直な方向が試験片長手方向, 平行な方向が試験片幅方向となるように加工した. この試験片長手方向は転動疲労試験における摺動方向である. 試験片は厚さ 1 mm, 幅 10 mm, 長さ 24 mm の平板形状であり, 熱間鍛伸により介在物は転動面に対して平行で, かつ摺動方向に対して垂直な方向に伸長した形を有している.

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 5.39GPa 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 μm および 1.48 μm となる. 全スキヤニング測定には, 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 秒とした.

2.3 スキヤニングによる介在物全数形状・分布の評価

介在物全数形状・分布評価法では, 図 2 に示すように摺動痕にわたって測定と移動を繰り返しながらラミノグラフィの走査測定を行う. 全てのラミノグラフィ結果を結合して, 摺動痕下のすべての介在物の分布および形状を把握する. 介在物形状および分布の特徴パラメータとして図 2 に示したように, 介在物の長さ a , 厚さ b , 面積 S などを算出する. 次に, 走査測定を行った試験片に対して, 転動疲労試験を実施する. 疲労試験中に適宜, 光学顕微鏡や電子顕微鏡による表面観察を行い, 表面き裂の発生や進展を調べる. これらの表面き裂およびフレーキング発生位置を基に, ラミノグラフィ測定結果からこれらの原因となった介在物を特定し, き裂やフレーキングの起点となった介在物の位置及び形状の特徴を調べる. 本手法によりラミノグラフィによる連続観

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.

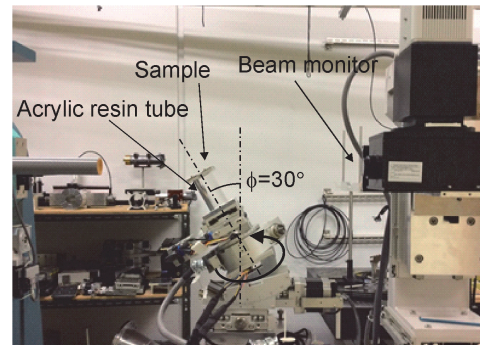


図 1 ラミノグラフィ測定装置の外観

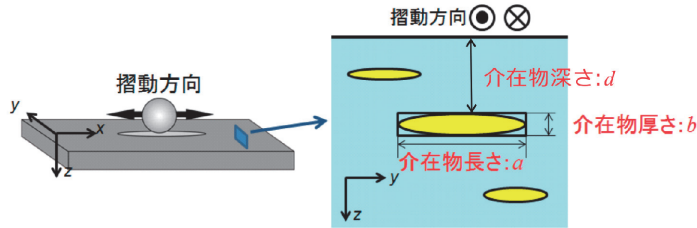
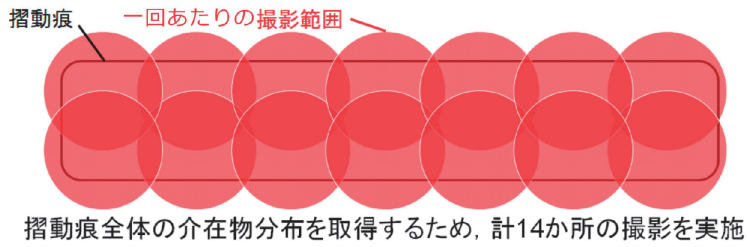


図2 介在物全数形状・分布評価法の概要

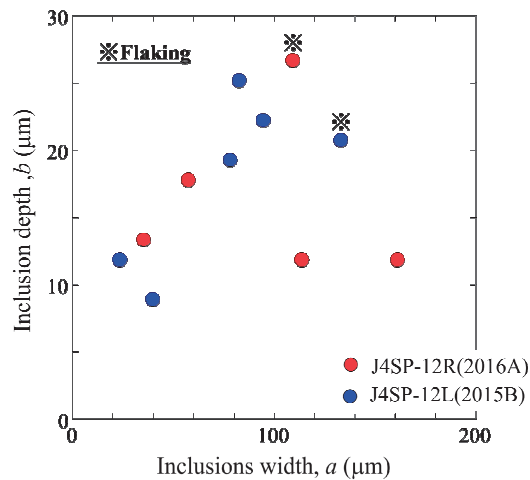


図3 介在物残数評価法による表面き裂発生起点およびはく離起点の介在物形状評価

察を行わずに、フレーキングの起点となる介在物形態の特徴を評価できる。

2015B 期に介在物全数評価を行ったサンプルにおいて表面き裂およびはく離の起点となった介在物の形状の特徴を調べた結果、転動面の表面に存在し、比較的深さ方向に長く、幅方向にも長く配向している介在物がはく離の起点となる可能性が高いことが分かった。そこで2016A 期では介在物全数評価の結果からはく離の起点となる可能性が高いものを選び、この介在物に対してき裂進展挙動を集中的に観察した。

3. 結果および考察：

3.1 実験結果

介在物全数評価および転動疲労試験から表面き裂が発生した介在物を特定し、その形状を調査した結果を図3に示す。これらのき裂は転動疲労試験中に発生し、*印を付けた介在物からはく離が発生した。また2015B 期に報告した結果を併せて示している。図中の介在物はすべて転動面に接触していた ($d=0$)。図3より、2015B 期の実験結果では、もっとも介在物の幅 a が大きい介在物からはく離が発生していたのに対して、2016A 期では、介在物が最も深くまで配向していたものがはく離の起点となっていることが分かる。したがって表面き裂の発生には転動面に介在物が接している必要があり、はく離の起点となる介在物の形状の特徴としては、幅方向の長さだけでなく、深さ方向にも長さも重要であることが明らかとなった。

$N=1.0 \times 10^5$ cycles の時点で、図3に示した介在物の中から幅方向の長さおよび深さ方向に大きな配向を持つ介在物に着目し、SPring-8 において転動疲労試験を行いながらラミノグラフィによるき裂の進展挙動の観察を行った。なお今回き裂進展観察に着目した介在物は、図3に示したはく離の起点となった介在物であった。ラミノグラフィによる転動疲労き裂の進展挙動の観察結果を

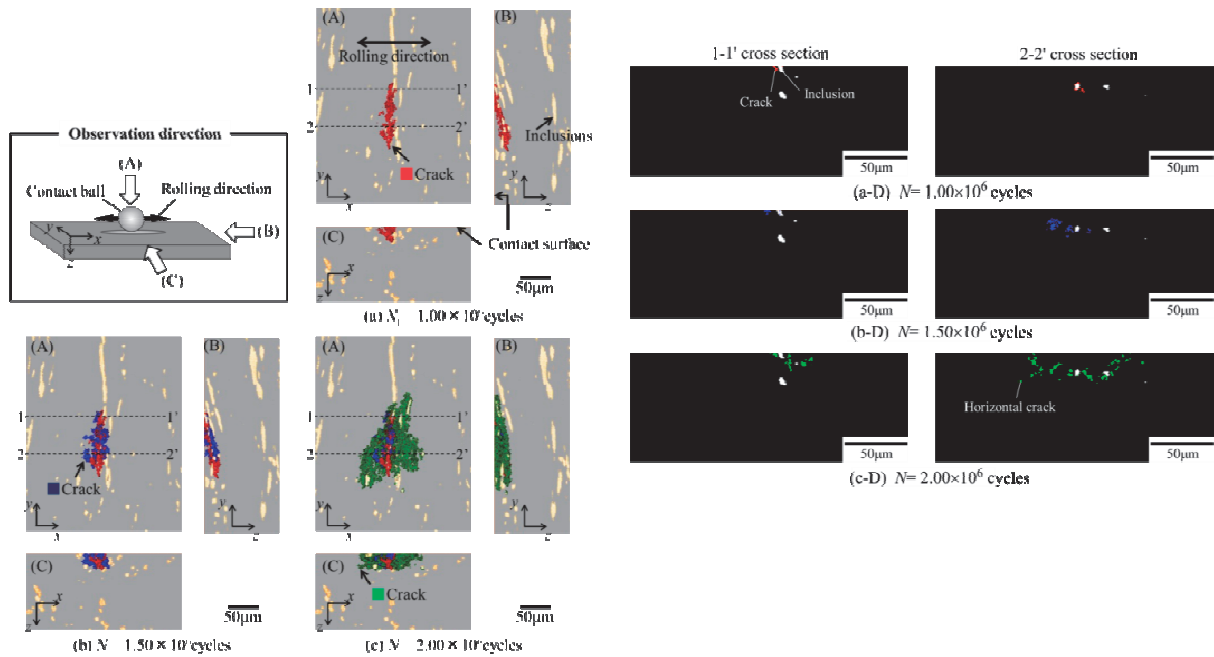


図4 ラミノグラフィによる転動疲労き裂の進展挙動観察結果

図4に示す．図4では(A)～(C)方向からの観察像，および(A)における点線の断面図(D)を示している．図4(a)より， $N=1.00 \times 10^6$ cycles 時において，転動面に垂直なき裂が介在物に沿って発生していることが分かる．さらに $N=1.50 \times 10^6$ cycles から 2.00×10^6 cycles にかけて転動面と水平なせん断型き裂が発生，進展している．このように転動疲労き裂は，まず転動面付近の介在物から転動面に垂直なき裂が発生し，深さ方向に進展した後，せん断型疲労き裂が発生することが明らかとなった．初期き裂進展過程である，疲労き裂が深さ方向に進展することがせん断型疲労き裂の発生とはく離形成につながることから，深さ方向に配向および分布した介在物がはく離に至る疲労き裂進展に影響を与える可能性が考えられる．

4. 今後の課題：

本課題実験により，介在物全数評価法を用いてき裂およびはく離の起点となった介在物の位置および形状について検討することができた．得られた介在物の特徴をもとにはく離の起点となる介在物を推定し，ラミノグラフィを用いた進展挙動観察を行ったところ，推定した介在物からはく離が発生した．これにより，はく離の起点となる介在物の特徴の確認が行われたとともに，疲労き裂発生からはく離に至る詳細な進展過程を効率的に観察することに成功した．

せん断型き裂の発生前におけるき裂進展過程と介在物形状との関係について，観察結果を詳細に解析し，さらに数値シミュレーションを用いた応力解析を行うことでき裂発生および進展に及ぼす介在物形状の影響について詳細な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.