

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
— 介在物全数形状・分布の評価

**Identification of Inclusion Originating Flaking in the Material with
Horizontal inclusion Orientation by SR X-ray Laminography
– Evaluation of Morphology and Distribution of All Inclusions
in the Loaded region**

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することに成功した。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検討する手法として、介在物全数形状・分布評価を行うことを検討した。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。実験では本手法を適用し、フレーキングの起点となった介在物を特定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)

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)[1][2]をき裂の観察手法として適用した。これまでの研究により、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)が存在する場合において、介在物からの転動疲労き裂の発生および進展過程について観察を行っている[3-6]。2015A 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た。実際のベアリングでは、転動球の摺動方向に対して、この水平介在物と同じ配向形態をとることが多い。2015A 期での実験の結果、水平介在物を有する試験片では、垂直介在物の場合と同様に、介在物から発生したき裂が深さ方向に進展した後に、転動疲労き裂の特徴である転動面に平行なき裂が発生して進展することが分かった。一方で、垂直介在物の試験片では初期に発生したき裂からフレーキングに至る場合が多いのに対して、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し、フレーキングの起点となる介在物およびき裂はその発生時期によらず、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。

そこで本課題実験では、フレーキング形成に及ぼす介在物形状の影響の調査方法として介在物全数形状・分布評価法を構築することを試みた。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、その際の表面観察結果と比較することにより、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を特定するものである。本手法によりフレーキングに寄与する介在物の特徴について検討することが可能となるものと考えられる。

実験：

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。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 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。

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

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.

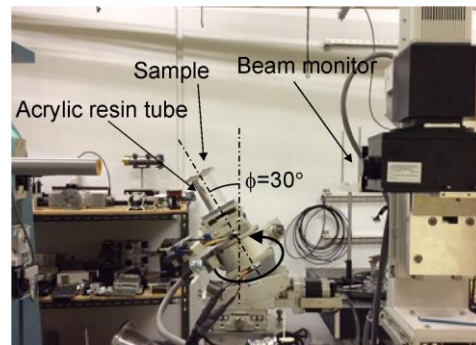


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

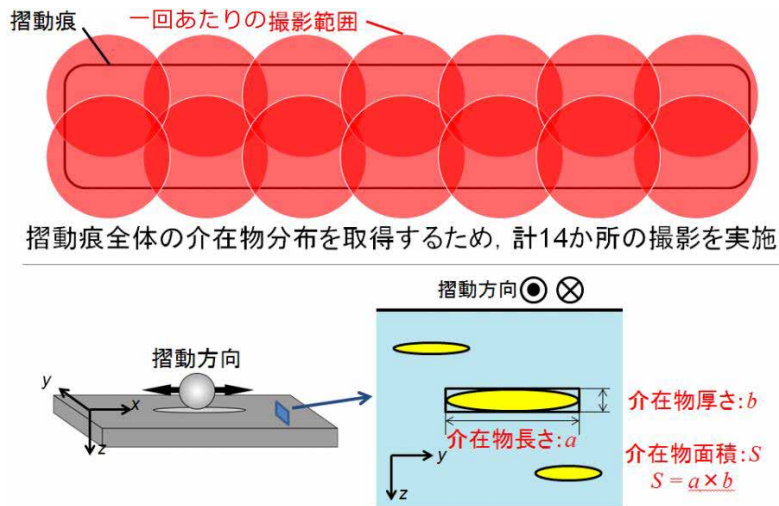


図2. 介在物全数形状・分布評価法の概要

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。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、き裂が発生する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。

結果および考察：

1 実験結果

介在物全数形状・分布評価を行った後に転動疲労試験を行った一例について述べる。転動疲労試験での表面観察結果を図3に示す。本試験片では、 $N=2.73 \times 10^6$ cycles 時において6つのき裂が発生していることが確認された(図3(a))。その後疲労試験と表面観察を繰返し行ったところ、Crack 4 付近からフレーキングが発生していることが分かった(図3(b))。表面観察では、Crack 4 は繰返し数とともに進展する挙動が観察された。2015AI 期および2015AII 期でのラミノグラフィを用いた観察において、表面き裂が進展する箇所の直下では、表面き裂の深さ方向への進展と転動面に平行なき裂の進展が生じており、このような進展が見られたき裂を起点としてフレーキングが発生することが確認されている。図3に示した試験片においても Crack 4 のき裂が内部で進展してフレーキングを形成したものと考えられる。

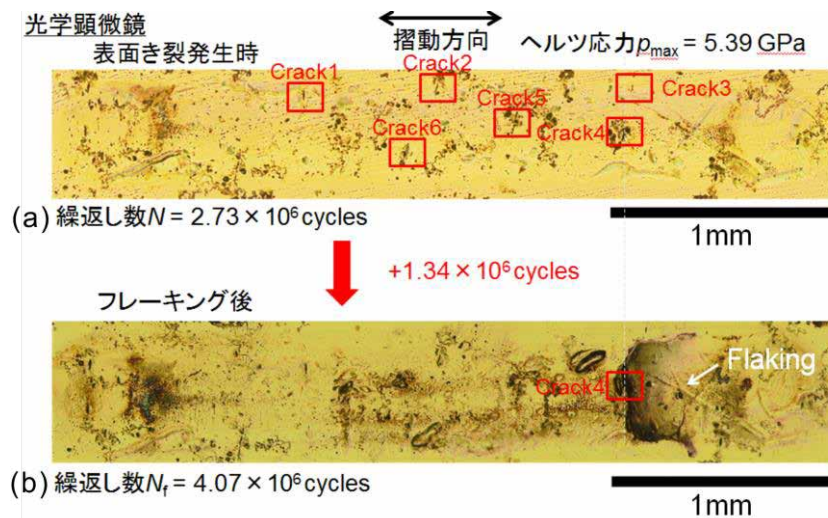


図3. 光学顕微鏡による表面き裂およびフレーキングの観察

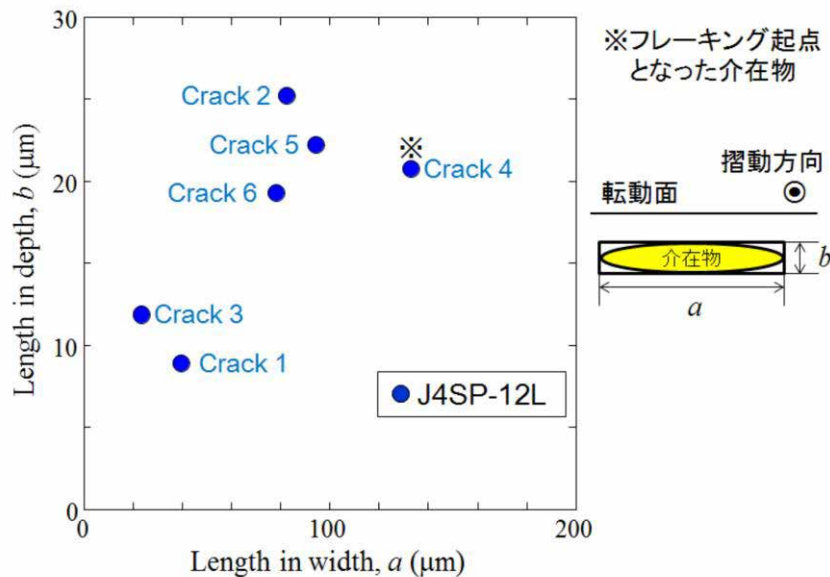


図4. 表面き裂が発生した介在物形状の特徴

6つの表面き裂の位置から、き裂の起点となった介在物を特定した。これらの介在物はいずれも表面近傍に存在し、介在物の一部が表面に接していた。介在物の形状および寸法を測定して、図2に示したように介在物の長手方向の長さ(介在物長さ a)と深さ方向の長さ(介在物厚さ b)の関係を整理した。表面き裂が発生した介在物形態を整理した結果を図4に示す。図4よりフレーキングの起点となった、Crack 4が発生した介在物は、 a が最も大きく、き裂が発生した介在物のなかでも比較的大きな b を有していることが分かる。2015AI・II期の実験においても a と b がともに大きな介在物がフレーキングの起点となっていた。

このように本手法を用いてき裂が発生する介在物やフレーキングの起点となる介在物を特定することができた。さらにラミノグラフィ測定による介在物の3次元的な形状の測定が可能であることから、データを蓄積すればフレーキングの起点となる介在物の特徴を解明することが可能と考えられる。

今後の課題：

本課題実験により、介在物全数形状・分布の測定結果を用いてき裂およびフレーキングの起点となった介在物を特定することが可能であることが明らかとなった。今後はさらにデータを蓄積してフレーキングの起点となる介在物の特徴について調査する。またこれまでの実験結果をもとに、介在物全数形状・分布の測定からフレーキングの起点となる介在物を推定することが可能となる。推定した介在物からフレーキングが生じるかの確認、さらにこれまでの観察よりも発生初期の疲労き裂の進展挙動について、ラミノグラフィと小型転動疲労試験機を用いたその場連続観察により調査を行う予定である。

参考文献：

- [1] 佐野雄二 他、平成23年度 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, pp.207-210 (2012).
- [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, OS2121(2014).
- [5] T. Makino et al., *International Journal of Fatigue*, vol.68, pp.168-177 (2014).
- [6] 牧野泰三 他、平成26年度 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2014A), 2014A1562.