

放射光 X 線ラミノグラフィによる
転動疲労き裂発生・進展挙動のその場観察-介在物寸法・形状の影響
In-situ Observation of Fatigue Crack Initiation and Propagation under
Rolling Contact by SR X-ray Laminography
– Effect of Inclusion Size and Morphology

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た。その結果、転動面および摺動方向に垂直なき裂が介在物に沿って発生・進展した後、フレーキングとなる水平なき裂が発生する様子が見られ、転動疲労き裂進展におけるき裂発生過程を観察することに成功した。本課題実験で転動疲労き裂の起点となった介在物は、2014A 期で観察したき裂の起点となった介在物よりも長い形状を有していた。介在物が長い場合では短い場合よりもフレーキング寿命が短いことから、介在物の形状や長さが垂直なき裂の発生・進展に影響を与え、さらにフレーキング寿命に影響を及ぼすことが示唆された。

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)

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。2013B 期では、BL19B2 ビームラインよりも輝度が高い放射光が利用可能な BL46XU を用いたラミノグラフィにより、厚さ 1 mm の試験片に対して、転動疲労で発生したき裂の観察が可能であることが明らかとなった[3][4]。これまでの研究により、転動疲労き裂では転動面に平行なせん断型のき裂(以降、せん断型き裂と呼ぶ)だけでなく、転動面に垂直なき裂(以降、垂直き裂と呼ぶ)が発生することが分かっている[5][6]。2014A 期課題実験では、ラミノグラフィを用いて一つの試験片に対して、介在物を起点とした垂直なき裂の発生および、この介在物からはく離が生じるまでの過程を観察することができた。しかしながら測定間隔が大きかったため、垂直き裂の詳細な成長挙動、および転動面に平行なせん断型き裂の発生や進展を得ることができなかった。そこで本課題実験では、表面き裂発生からはく離までの期間における測定間隔を改良することにより、垂直き裂の発生からはく離形成挙動までの観察を中心に行った。また観察結果から介在物形状や、垂直き裂がはく離形成に及ぼす影響について検討を行った。

実験：

介在物からのき裂発生を観察するために、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。表 1 に供試鋼の代表的な化学成分を示す。多量の S 量(0.049 mass%)を含有する SUJ2 鋼を、真空溶解炉を用いて 150 kg インゴットに溶製した。これを熱間鍛伸により直径 60 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垂直面(横断面)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 30 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。この板材から、厚さ 1 mm、幅 10 mm、長さ 24 mm の平板形状の試験片を切り出した。熱間鍛伸により介在物が試験片厚さ方向に伸長した形を有している。

転動疲労試験は、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、試験片はリニアガイド上に設置されている。リニアガイドは偏心カムに接続されており、偏心カムの回転運動によりリニアガイドの直線往復運動を生じさせる。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。本試験機では試験片の着脱が容易であり、ラミノグラフィ測定後も同じ個所に試験片の設置が可能な仕様となっている。本実験では直径 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。

試験開始から離形成までには多くの試験時間を要し、また破断寿命のばらつきを有するため、ビームタイム内ですべての過程を観察するのは困難である。2014A 期課題実験では、表面に近い介在物から転動面に垂直なき裂が形成され、表面き裂として観察されることが明らかとなった。そこで SPring-8 での観察前に転動疲労試験を行い、試験片表面でき裂発生が確認された時点で疲労試験を中断した。その後 SPring-8 においてラミノグラフィによる測定と疲労試験を再開してき裂進展挙動の観察を行った。

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(図 1)。BL19B2 ビームラインの線源は偏光磁石であるのに対して、BL46XU はアンジェレータを線源としており、より輝度が高い放射光の利用できることから、より厚い試料に対しても短い露光時間での撮影が可能となった。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ー 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 つの検出画素を構成する 2×2 ビニングモードを使用し、このときの有効ピクセルサイズは 0.74 μm である。また一部ではき裂の確認を目的として 4×4 ビニングモードを用いた。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 4 秒である。

結果および考察：

$P_{\max}=5.39\text{GPa}$ の試験片における観察結果(Specimen 2014B-I)の例を示す。この試験片では、繰返し数 $N=6.0\times 10^6$ cycles で、試験片表面において介在物から転動面に垂直なき裂が発生していることが確認された。その後、SPring-8 において疲労試験を行いながら、ラミノグラフィによる撮影を行った。またレプリカ法を用いて表面におけるき裂の成長を記録した。本試験片は $N_f=7.67\times 10^6$ cycles でフレーキングが発生した。

ラミノグラフィによる観察結果から介在物およびき裂を 3 次元表示したものを図 2 に、表面でのレプリカによる観察結果を図 3 にそれぞれ示す。図では摺動方向を x 軸、板厚方向(深さ方向)を z 軸とし、図 2 では観察方向を変えた再構成像を示している。また図 2(a)から(e)の順番に以前の観察結果に新しい観察結果を重ねて表示して、進展挙動の変化を示している。図 2(a)より、介在物から、転動面および摺動方向(x 軸方向)に対して垂直なき裂が発生していることが分かる。この垂直なき裂(赤色)の起点となった介在物(黄色)は、板厚方向(z 軸方向)に 60 μm ほどの長さを有している。(b) $N=6.8\times 10^6$ cycles(黒色)では、表面でのき裂長さに変化は見られないのに対して、 z 方向(深

表 1. 供試鋼(SUJ2)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.

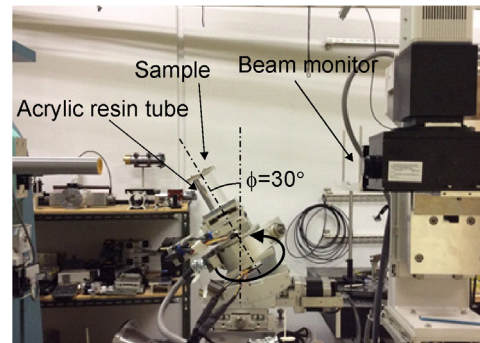


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

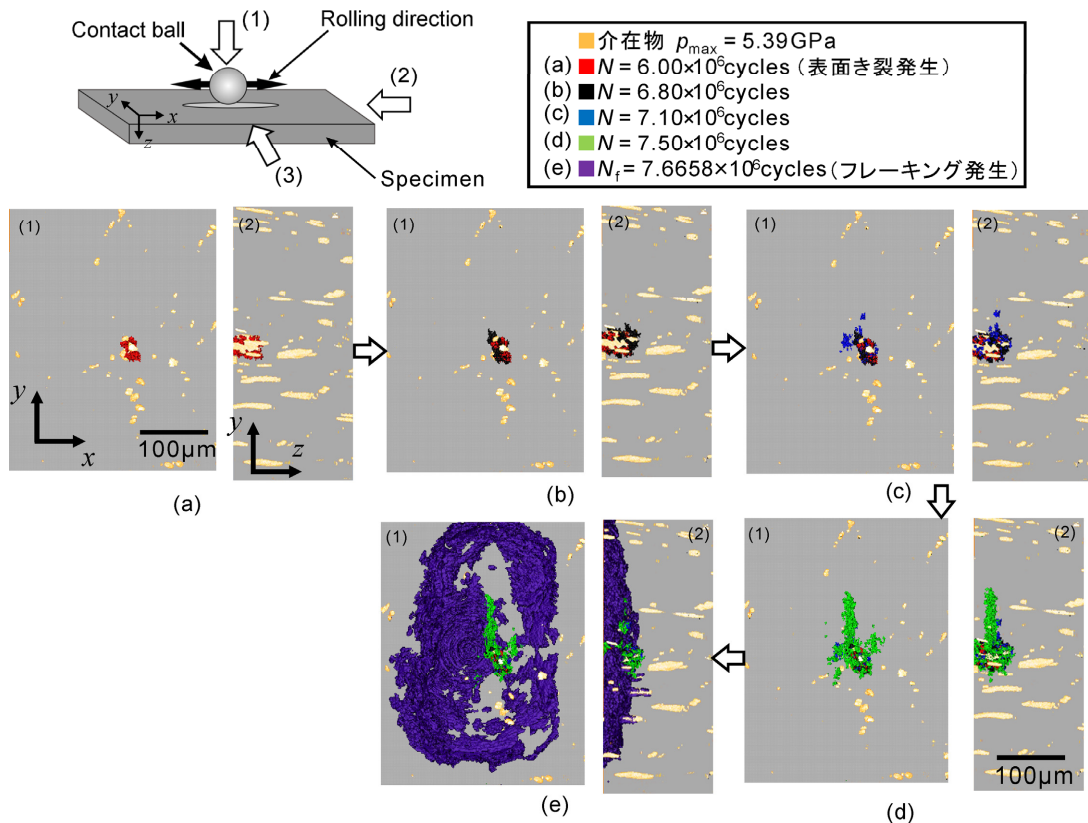


図 2. 転動疲労き裂の発生および進展挙動(Sample 2014B-I)

さ方向)に進展し、介在物の最深部まで伸びている。(c) $N=7.10 \times 10^6$ cycles(青色)では表面から $30 \mu\text{m}$ の深さにおいて転動面に平行なせん断型き裂が発生し、(d) $N=7.50 \times 10^6$ cycles(緑色)ではせん断型き裂が y 方向に進展している。この進展が見られたせん断型き裂は、最大せん断深さの発生位置よりも浅い位置に発生しており、反対側にはさらに異なる深さにもせん断型き裂が発生している様子が見られた。異なる深さ位置から複数のせん断型き裂が発生する挙動は、人工欠陥を用いた実験においても確認している[6]。(e) $N=7.67 \times 10^6$ cycles で、この垂直き裂およびせん断型き裂を中心として、はく離(紫色)が生じた。

次に試験片表面でのレプリカ観察結果を示した図 3 より、表面では垂直き裂はほとんど成長していないことが分かる。図 2 のラミノグラフィ観察結果においても、垂直き裂の表面付近では変化が見られていない。一方で、内部では垂直き裂の成長、およびせん断型き裂の発生と進展が生じた。これは垂直き裂の内部方向での成長が、せん断型き裂の発生に影響を与えたことを示唆している。

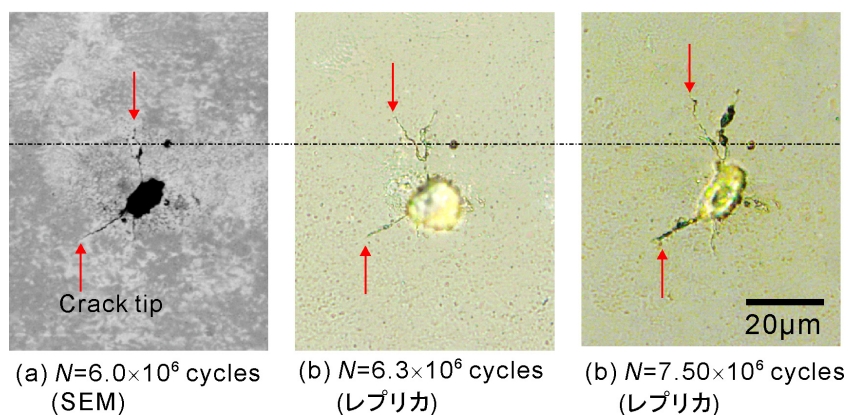


図 3. 表面観察結果(Sample 2014B-I)

これらの観察結果から、次のようなはく離発生過程が明らかとなった。(1)表面に近いまたは接する介在物から転動面に垂直なき裂が発生し、(2)深さ方向に介在物に沿って伸びる。(3)垂直なき裂が進展した後、転動面に平行なせん断き裂が発生する。(4)せん断き裂が進展し、はく離が生じる。

次に 2014A 期における転動疲労き裂と比較するために、2014A 期において観察された結果(Specimen 2014A-I, $N_f=1.295 \times 10^7$ cycles)を図 4 に示す。図 4 より、2014A 期の観察では、2014B 期と比較して試験片厚さ方向に 30 μm と短い介在物からき裂が発生しており、垂直なき裂は介在物よりも深い位置まで進展した後にせん断き裂が発生してフレーキングに至っていることが分かる。2014A および 2014B 期の垂直なき裂は、ともに 50~60 μm 程度までに進展していた。表面き裂が確認されるまでの繰返し数およびフレーキング寿命は、2014A 期のほうがともに長い。2014B 期の観察において、転動面に垂直なき裂の進展後、せん断型き裂が発生することが分かったことから、介在物の長さが垂直なき裂発生や進展に影響を及ぼし、さらに垂直なき裂の進展がせん断型き裂の発生に影響を与えたものと考えられる。このように 2014A 期と 2014B 期で観察したサンプルでは、破壊の起点となった介在物形状の違いが破断寿命の違いに現れた可能性がある。

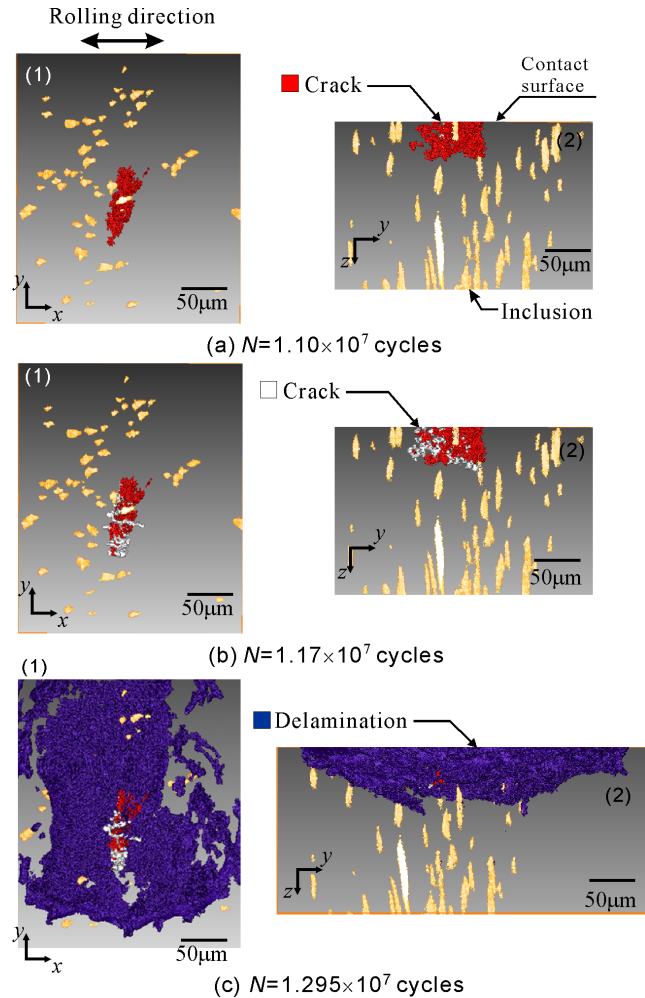


図 4. 転動疲労き裂の発生および進展挙動 (Sample 2014A-I)

今後の課題：

以上のように、転動疲労き裂の進展過程において、介在物を起点とした垂直なき裂の発生からせん断型き裂の発生、およびはく離に至るまでの挙動を、ラミノグラフィを用いることにより観察することに成功した。その結果、介在物から発生した垂直なき裂がはく離に至るせん断型き裂の発生に影響を及ぼすことが明らかとなった。今後は、介在物の長さが疲労寿命に与える影響について、介在物が短い場合に関する詳細な実験データを取得することや、垂直なき裂とせん断型き裂発生との関連性について数値解析を援用することにより、さらなる検討を加える予定である。

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(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(2014), OS2121.
- [5] 塩澤大輝 他、日本材料学会 第 31 回疲労シンポジウム(2012).
- [6] T. Makino et al., *International Journal of Fatigue*, vol. 68 (2014).