

## 放射光ラミノグラフィによる介在物からの転動き裂発生および はく離形成挙動のその場観察

### Observation of Rolling Contact Fatigue Crack Propagation and Delamination Behavior by Using Synchrotron Radiation Laminography

牧野 泰三<sup>a</sup>, 根石 豊<sup>a</sup>, 中井 善一<sup>b</sup>, 塩澤 大輝<sup>b</sup>, 菊池 将一<sup>b</sup>  
Taizo Makino<sup>a</sup>, Yutaka Neishi<sup>a</sup>, Yoshikazu Nakai<sup>b</sup>, Daiki Shiozawa<sup>b</sup>, Shoichi Kikuchi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>新日鐵住金(株)技術開発本部鉄鋼研究所, <sup>b</sup>神戸大学大学院工学研究科  
<sup>a</sup>Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, <sup>b</sup>Kobe University

表面下内部の介在物から発生・進展する転動疲労損傷のメカニズムを解明するために、ラミノグラフィを用いたき裂の発生およびはく離形成挙動を観察する手法の構築を検討した。ラミノグラフィでは、BL46XU ビームラインを使用することにより、転動疲労試験が可能な1 mmの厚さの板状サンプルの測定が可能となった。本課題実験では介在物を起点としたき裂発生からはく離に至るまでの過程の観察を行うことができた。表面付近の介在物から発生したき裂は、介在物よりも深い位置まで進展しており、はく離の起点となったものと考えられることから、介在物形状およびき裂がはく離形成の要因となることが明らかとなった。

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し、破面がつぶされることから、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。これまでに、CT(Computed Tomography)を用いて人工欠陥および内部介在物から発生したき裂の観察を行った[1-4]。CTではすべての入射方向からX線が観察部を透過する必要がある。そのため観察部を小さくしたところ、き裂発生後にすぐに試験片が破断したためき裂進展過程を観察することが困難であった[3]。そこで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)[5, 6]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[7, 8]。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だけでなく、転動面に垂直なき裂が発生することが分かっている。これらのき裂発生・進展挙動を明らかにするには同一の試験片に対して転動疲労試験を行いながら、き裂発生および進展の様子を連続的に観察する必要がある。2014AI期では疲労試験前からき裂発生までの過程を観察することができた。本課題実験では、小型転動疲労試験機と放射光ラミノグラフィを組み合わせることにより、疲労き裂進展からはく離形成の過程の観察を試みた。

#### 実験：

##### 2.1 転動疲労試験機および試験片

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(0.017 mass%)を含有するSUJ2鋼を、真空溶解炉を用いて150 kgインゴットを溶製した。溶製したインゴットは、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は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のみ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。

試験開始からはく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。

最大ヘルツ圧  $P_{\max}$  は 5.39 GPa および 6.59 GPa とし、表面き裂が発生した試験片を計 3 本用意した。 $P_{\max}=5.39$  GPa では  $N=1.10 \times 10^7$  cycles で、 $P_{\max}=6.59$  GPa では  $5.0 \times 10^5$  cycles および  $1.3 \times 10^6$  cycles でそれぞれ表面き裂の発生が確認された。

## 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。BL19B2 ビームラインの線源は偏向電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 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 つのピクセルを構成する 2x2 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  $\mu\text{m}$  である。測定装置の外観写真を図 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、 $0^\circ$  から  $360^\circ$  まで  $0.3^\circ$  および  $0.5^\circ$  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 350 mm とし、露光時間は 4 秒である。

## 結果および考察：

### 3.1 はく離発生過程の観察

$P_{\max}=5.39$  GPa の試験片における SPring-8 測定前およびフレーキング発生後の光学顕微鏡写真を図 2 に示す。図 2 では摺動方向に  $x$  軸をとっている。図 2(a)より、 $N=1.10 \times 10^7$  cycles 時点で摺動痕の幅方向中央に、摺動方向に対して垂直に進展する表面き裂が発生していることが分かる。

SPring-8 での実験再開後の  $N=1.295 \times 10^7$  cycles で、図 2(b)に示したように表面き裂が確認された位置においてはく離が生じた。図 2(a)から(b)までの転動疲労試験の過程をラミノグラフィにより観察した。

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 3 に示す。図 3 では摺動方向を  $x$  軸、板厚方向(深さ方向)を  $z$  軸とし、図 3(a)から(c)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いる。図 3(a)より、表面き裂の起点となった介在物は、板厚方

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	0.017	1.50	Bal.

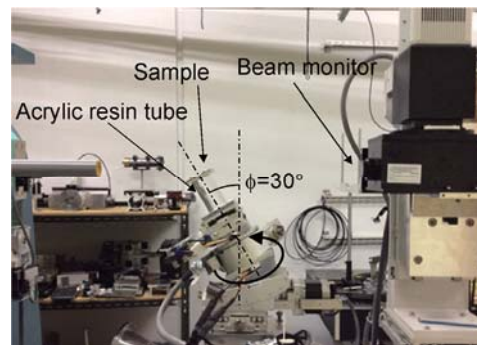


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

向に  $30\ \mu\text{m}$  ほど伸びた円柱形状をしていることが分かる。また介在物から発生した表面き裂(図中赤色部)は、深さ方向に延伸した介在物よりも深い位置まで進展している。次に疲労試験を再開した後の観察結果(図中白色部)である図 3(b)より、き裂が前回の赤色部と比較してわずかに  $z$  軸方向への進展していることが分かる。図 3(c)では、はく離が生じた後の観察結果を示している。はく離(図中青色部)は表面き裂が観察された位置を中心として生じている。

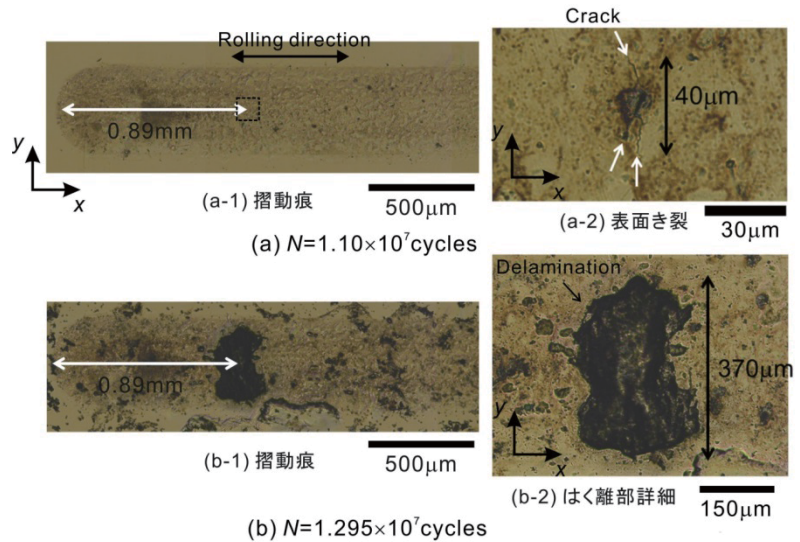


図 2. 表面き裂およびはく離の光学顕微鏡写真

またはく離が生じる以前の測定結果では、はく離の進展過程であるせん断型き裂は見られなかったことから、図 3(a)および(b)で観察された表面き裂がはく離の起点となったものと考えられる。

さらに、表面き裂が存在していた位置のはく離の深さと、表面き裂の深さはほぼ一致していた。

はく離深さよりも浅い位置の介在物が起点となったことから、表面き裂がある深さに達したことが、せん断型き裂が発生する要因となったことが考えられる。このように、介在物から発生した表面き裂がはく離形成に影響を与えた可能性があることから、はく離が発生する深さにない介在物における表面き裂発生条件や進展挙動の評価が重要となるものと考えられる。

### 3.2 き裂発生の有無に対する介在物形状の比較

図 3 に示したように、観察では多数の介在物が確認された。これらの介在物形状を整理することにより、き裂が発生する介在物の特徴を検討した。介在物の一部が転動面に近く、同じ転動方向の線上に位置して応力状態が近いと考えられる介在物を比較した結果を図 4 に示す。図 4-(1)に転動面表面における介在物像を、図 4-(2)に摺動方向( $x$  方向)に介在物を投影した像をそれぞれ示している。投影面積を  $\sqrt{\text{area}}$  を用いて比較したところ、き裂が発生しなかった介在物(b)の転動面に近い介在物では、 $\sqrt{\text{area}_{(b)}}=13.6\ \mu\text{m}$  であり、き裂が発生した介在物(a)では  $\sqrt{\text{area}_{(a)}}=12.5\ \mu\text{m}$  であった。

介在物(b)でき裂が発生しなかった要因として、き裂が発生した介在物よりも形状の重心が表面から深い位置にあることが考えられる。このようにはく離の起点となる介在物形状の評価において、応力分布や形状などを考慮したパラメータを検討する必要がある。

#### 今後の予定：

以上のように本実験では表面き裂発生からはく離損傷までの過程を観察することに成功した。

はく離形成過程については、測定前にはく離が発生して破損したため観察することができなかったが、観察結果から、はく離深さよりも浅い位置の介在物が起点となっていることから、介在物から発生した表面き裂がはく離形成に影響を及ぼす可能性が示唆された。また介在物の深さ方向の形状が表面き裂の発生と進展速度に影響を与えることも考えられることから、さらに実験データを取得して、介在物の形状および表面き裂と破損寿命について整理する予定である。

#### 参考文献：

- [1] 牧野泰三 他、SPring-8 利用研究成果集(査読中), 2012A1596.
- [2] 牧野泰三 他、平成 24 年度 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2012B), 2012B1735.
- [3] 塩澤大輝 他、日本材料学会 第 31 回疲労シンポジウム(2012), pp. 72-76.
- [4] T. Makino et al., *International Journal of Fatigue*, vol. 68 (2014), pp. 168-177.



- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.

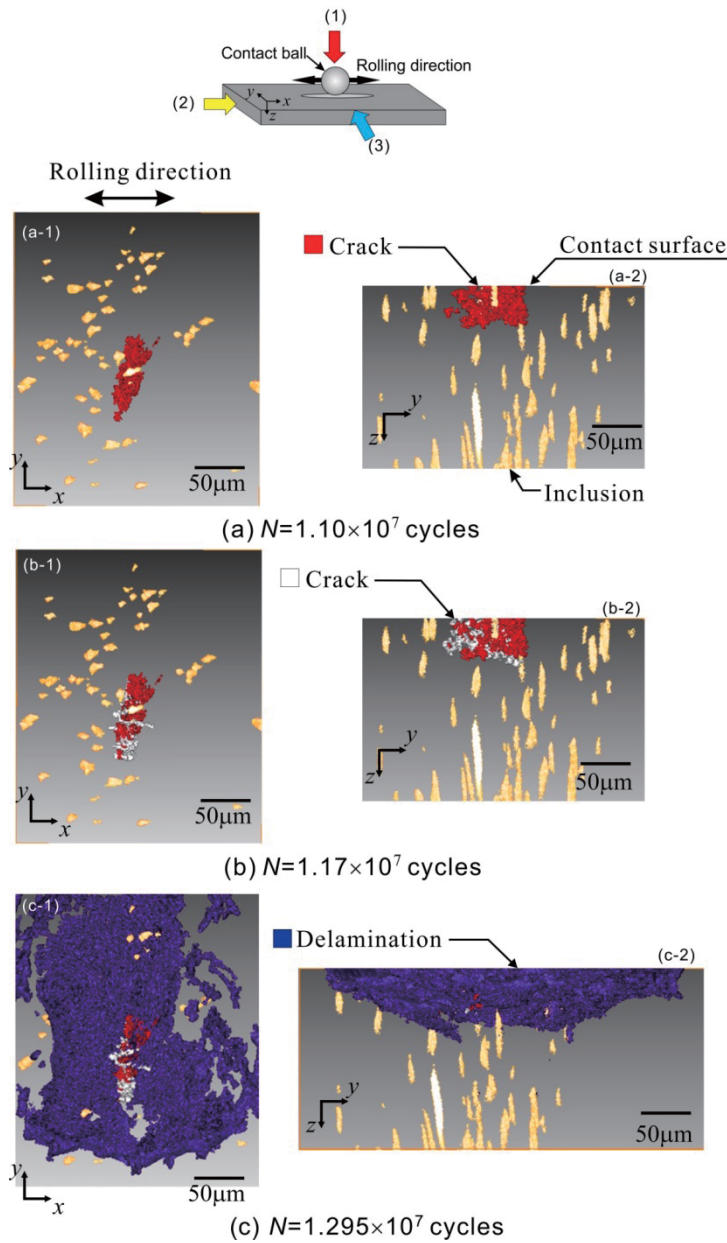


図 3. 表面き裂およびはく離の 3 次元形状の時間変化 ( $P_{max}=5.39$  GPa)

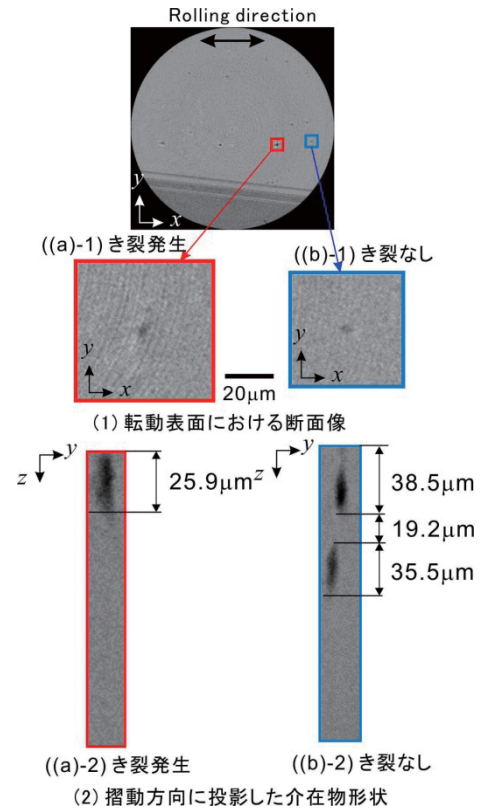


図 4. 表面き裂発生における  
介在物形状の比較  
( $P_{max}=5.39$  GPa,  
 $N=1.10 \times 10^7$  cycles)