

放射光 X 線ラミノグラフィによる  
転動疲労き裂発生および進展挙動のその場観察  
-き裂起点介在物の特徴明確化

**In-situ Observation of Fatigue Crack Initiation and Propagation under  
Rolling Contact by SR X-ray Laminography  
- Inclusion Feature of Crack Origin**

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といった、転動疲労き裂の発生および進展過程を観察することに成功している。本課題実験では、2014BI 期で観察されたき裂の起点となった介在物よりも、短い形状を有する介在物からき裂が発生する過程を観察することに成功した。また任意の介在物形状の影響を調べるために、介在物を模擬した人工欠陥から発生する転動疲労き裂の進展挙動の観察を行った。その結果、人工欠陥の深さがフレーキング深さよりも大きい場合では、実介在物と同様の転動疲労き裂の発生および進展挙動が生じることが確認された。

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。さらにき裂発生部分が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 および 2014BI 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からせん断型き裂の発生、およびせん断型き裂が進展してはく離が生じる過程を観察することに成功した。本課題実験では、様々な形状の介在物に着目してフレーキング過程の観察を行い、介在物形状および垂直き裂がフレーキング形成に与える影響を調べた。また、調査したい形状を有する介在物に関する転動疲労き裂の進展過程を観察できるとは限らない。そこで介在物を模擬した人工欠陥を用いてフレーキング形成過程を連続観察することを試みた。

## 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 インゴットに溶解した。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。介在物を多量に含む試験片(以降、実介在物材)に対して、介在物を模擬した人工欠陥を導入した試験片(以降、人工欠陥材)を用意した。人工欠陥材では、通常の SUJ2 鋼を用いており、実介在物材と同様の形状の試験片に対して、放電加工により転動面に垂直に、直径 15  $\mu\text{m}$  の穴を導入した。放電加工による穴の深さは 56  $\mu\text{m}$  および 150  $\mu\text{m}$  である。転動疲労試験では、この人工欠陥が摺動痕上に位置するように試験片の位置を設定した。

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。

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。実介在物材および人工欠陥材ともに、最大ヘルツ圧  $P_{\text{max}}$  は 5.39 GPa とした。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。

## 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)。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 つの検出画素を構成する 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。また一部ではき裂の確認を目的として 4x4 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、 $0^\circ$  から  $360^\circ$  まで  $0.5^\circ$  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 300 mm とし、露光時間は 2x2 ビニングモードでは 4 秒である。

## 結果および考察：

### 実介在物材における実験結果

本課題実験で得られた実介在物材における観察結果の例を図 2 に示す。この試験片では、繰返し数  $N=7.50 \times 10^6$  cycles で、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

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.

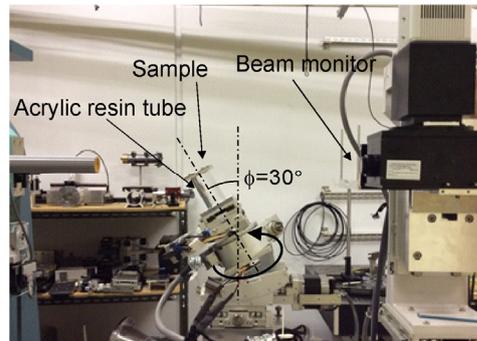


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

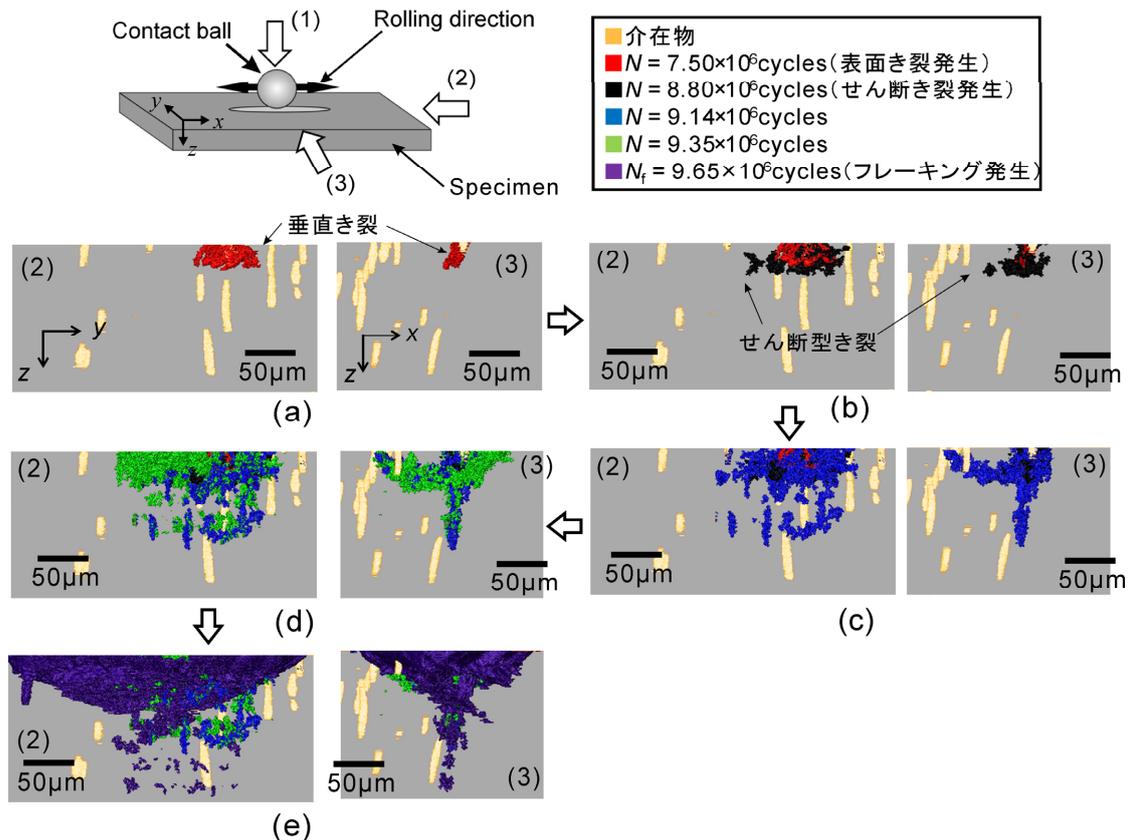


図 2. 介在物を起点とした転動疲労き裂の発生および進展挙動(実介在物材)

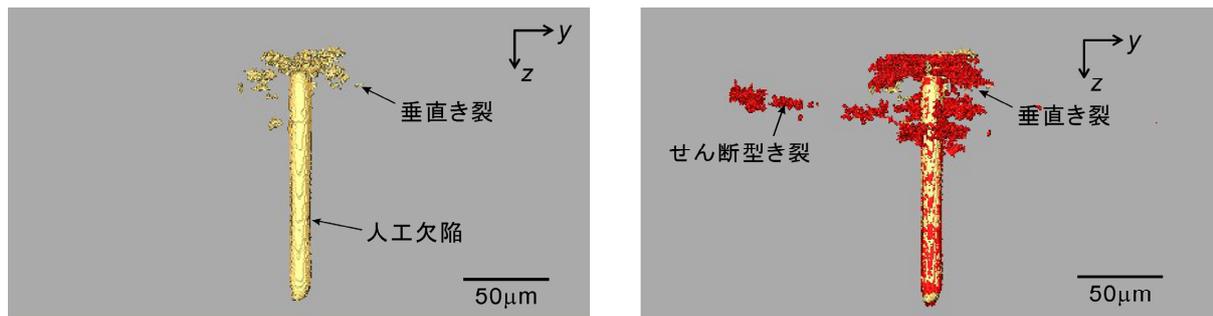
において疲労試験を行いながら、ラミノグラフィによる撮影を行ったところ、 $N_f=9.65 \times 10^6$  cycles でフレーキングが発生した。

図 2 では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示している。同図では摺動方向を  $x$  軸、板厚方向(深さ方向)を  $z$  軸とし、それぞれ観察方向を変えた再構成像である。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、進展挙動の変化を示した。図 2(a)より、 $z$  軸方向に延伸した介在物(黄色)の中で、垂直き裂(赤色)の起点となった介在物は、板厚方向に  $25 \mu\text{m}$  程度の長さを有していることが分かる。(b) $N=8.80 \times 10^6$  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(深さ方向)に進展しており、さらにせん断型き裂が発生している。せん断型き裂は、表面から約  $23 \mu\text{m}$  の深さの位置に発生した。(c) $N=9.14 \times 10^6$  cycles(青色)および(d) $N=9.35 \times 10^6$  cycles(緑色)では、垂直き裂が深さ方向に大きく進展するとともに、せん断型き裂も摺動方向に進展している。(e) $N_f=9.65 \times 10^6$  cycles でこのせん断型き裂からはく離(紫色)が生じた。

2014BI 期で観察された実験結果では、介在物長さが  $60 \mu\text{m}$  程度とフレーキング形成面よりも深い位置まで伸びた長い介在物を起点としたフレーキング形成過程が観察された。本実験で観察された、長さ  $25 \mu\text{m}$  の介在物の場合と比較したところ、次のことが明らかとなった。

- (1) いずれの介在物形状の場合においても垂直き裂が発生し、垂直き裂が成長した後にせん断き裂が発生する。
- (2) 今回の転動疲労試験条件では、いずれの介在物形状においてもせん断型き裂は表面から  $25 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$  付近の深さに発生する。
- (3) せん断型き裂発生前に、垂直き裂はせん断型き裂の発生位置よりも深くまで進展する。
- (4) 介在物が長い場合では、表面き裂確認( $N=6.00 \times 10^6$  cycles)、せん断型き裂の確認繰返し数( $N=7.10 \times 10^6$  cycles)、およびフレーキング発生繰返し数( $N_f=7.67 \times 10^6$  cycles)ともに介在物長さが短い場合よりも短い。

以上のように 2014BII 期の観察では、これまでよりも短い長さの介在物から発生したフレーキング過程を観察することができたことにより、フレーキングの形成に及ぼす介在物形状または垂直き裂の影響に関するデータを得ることができた。



(a)  $2.4 \times 10^6$  cycles

(b)  $3.0 \times 10^6$  cycles

図 3. 人工欠陥から発生した転動疲労き裂の進展挙動

### 人工欠陥材における実験結果

2014BI 期およびⅡ期でフレーキングの深さよりも介在物が短い場合および深い場合となる介在物形状におけるフレーキング形成過程を観察することができた。しかしながら、さらに介在物が短い場合や長い場合など、調査したい形状および寸法の介在物に関する転動疲労き裂の発生過程を観察できるとは限らない。介在物を模擬した人工欠陥について、実介在物と同様のメカニズムのフレーキング形成過程が観察できれば、介在物形状の影響を詳細に評価することが可能となる。本実験では人工欠陥材についてラミノグラフィによる連続観察を行った。観察結果の一例として、直径  $15 \mu\text{m}$ 、長さ  $150 \mu\text{m}$  の人工欠陥を有する試験片におけるラミノグラフィ再構成画像を図 3 に示す。同図はラミノグラフィによる観察結果から人工欠陥およびき裂を 3 次元表示したものであり、観察の方向は図 2 と同様の座標系とした。また比較のため図 3(b)では、図 3(a)での観察結果を合わせて示した。図 3 より、人工欠陥材においても、実介在物材と同様に垂直き裂が発生した後、せん断型き裂の発生することが明らかとなった。また、せん断型き裂の発生深さは実介在物材の場合とほぼ同じであった。このように人工欠陥長さが長い場合では、実際の介在物と同様のフレーキング形成過程を示すことが分かった。

### 今後の課題：

以上のように、本課題実験では、長さが異なる介在物を起点として生じたフレーキング形成過程が観察された。その結果、いずれの介在物においても垂直き裂がはく離に至るせん断型き裂が発生する深さまで進展した後、せん断型き裂が発生する様子が確認された。また介在物を模擬した人工欠陥を用いて、フレーキング形成過程を観察することを検討した結果、人工欠陥がせん断型き裂の発生位置よりも長い場合では、実介在物と同様のフレーキング形成過程を示すことが分かった。今後、様々な深さを有する人工欠陥について観察を行い、実介在物でのフレーキング形成過程との比較を行う予定である。また、実介在物および人工欠陥において得られたフレーキング形成過程について、数値解析を用いて介在物形状の影響を評価する予定である。

### 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).