

## 放射光 X 線ラミノグラフィによる転動疲労き裂の観察(2) Observation of Rolling Contact Fatigue Crack by SR X-ray Laminography(2)

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>  
Taizo Makino<sup>a</sup>, Yutaka Neishi<sup>a</sup>, Yoshikazu Nakai<sup>b</sup>, Daiki Shiozawa<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

転動疲労は表面内部の介在物からき裂が発生・進展するため、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。そこで本研究では SPring-8 の放射光を用いたイメージングと新たに開発した小型転動疲労試験機を用いて、同一試験片について転動疲労き裂進展挙動の観察を行っている。本課題実験では、転動疲労き裂の発生進展を観察する手法として、ラミノグラフィを適用することを検討した。通常の CT イメージングでは透過厚さの制限から試料の観察部分は 1 mm 以下の大きさとする必要があるため、き裂発生直後に試料が破断し、進展過程を観察することが困難であった。そこで本課題実験では、プリント基板の非破壊検査に適用されている内部観察手法であるラミノグラフィの転動疲労き裂への適用性について検討を行った。さらにき裂深度計を用いてき裂の簡易評価を行った。き裂深度計による評価をもとに転動疲労過程の三段階の状態の試料についてラミノグラフィにより観察したところ、転動面の背面から発生したき裂の影響により、転動面表面付近にき裂が発生し、フレーキングが生じていることが分かった。これは試料厚さが薄い場合に特有の疲労き裂進展挙動である可能性がある。

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：

本研究では SPring-8 の放射光を用いた CT 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・進展挙動を観察することを目的とする。これまでに、CT イメージングが直接可能な試験片とこの試験片のための転動疲労試験機を開発し、転動疲労試験と CT 観察を繰り返すことにより同一試料において転動疲労き裂がどのように発生・進展するかを連続観察することを可能とした。介在物を模擬した人工欠陥を有する試験片に対して、人工欠陥からのき裂の発生・進展挙動を観察することに成功している[1]。実際の介在物からの転動疲労き裂の発生過程の観察を試みたところ、CT 観察部を小さくしたため、き裂発生後にすぐに破断が生じ、き裂進展過程を観察することが困難であることが分かった[2][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ラミノグラフィの適用を検討した。2013A1 期ではラミノグラフィによりき裂形状の観察が可能であることが明らかとなった。本課題実験では、き裂深度計を用いてき裂の発生および進展程度の簡易評価を行い、この簡易評価をもとにラミノグラフィを用いてき裂の観察を行った。き裂深度計およびラミノグラフィの組み合わせの、転動疲労におけるき裂進展過程の評価およびき裂進展メカニズムの解明への適用性について検討を行った。

### 実験：

#### 2.1 転動疲労試験機および試験片

試験片およびラミノグラフィの概要図[4][5]および外観写真を図 1 に示す。ラミノグラフィでは図 1 に示すように試験片および CT 観察用回転ステージをφだけ傾けて設置し、この状態で回転ステージを回転させながら透過像を取得する。360°回転させた場合、図 1 に示すように全ての角度において X 線が透過する領域ができる。この領域に関する透過像を画像処理により作成して画像再構成を行うと、観察領域の断層画像が得られる。平板状のサンプルの場合、通常の CT では透

過しないサンプル厚さの X 線入射角度が出来るのに対して、ラミノグラフィでは全ての角度で透過可能な厚さが保たれる。ただし透過像に対して画像処理を施す必要があるため、本手法では CT と比較して鮮明な画像が得られない。

介在物からのき裂発生を観察する場合には、転動疲労起点となる主たる介在物が MnS となるように調整するため、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 インゴットに溶製した。表 1 に供試鋼の代表的な化学成分を示す。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。そして、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。

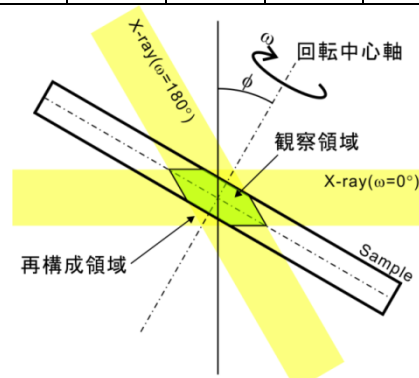
2013A1 期でのラミノグラフィの測定条件に関する検討から、試験片厚さ  $t$  を 0.4mm、および 0.5mm とした。転動疲労試験は、開発した小型転動疲労試験機で行った。本疲労試験機では、試験片はリニアガイド上に設置されている。リニアガイドは偏心カムに接続されており、偏心カムの回転運動によりリニアガイドの直線往復運動を生じさせる。森式転動疲労試験機では一方向のみにボールが摺動するのに対して、本疲労試験機では試験片の CT およびラミノグラフィの観察部位上をボールが往復する。試験片の着脱が容易であり、X 線が透過可能な試験片サイズでも転動疲労試験が可能な仕様となっている。本実験では直径 6.0 mm の鋼球を用いており、ボールの摺動距離は 3 mm である。

## 2.2 ラミノグラフィ観察条件

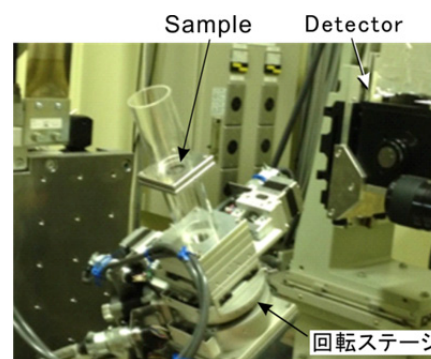
CT イメージング撮影は SPring-8 の BL19B2 ビームラインで行った。撮影では Si(111)モノクロメータにより単色化した X 線を用いた。検出器にはビームモニタ BM(x10)と CCD カメラ (C4880-41S) の組み合わせを用いた。検出器は 4 つのピクセルで 1 つのピクセルを構成する 4x4 ビニングモードを使用し、このときの有効ピクセルサイズは 1.48  $\mu\text{m}$  である。ラミノグラフィの回転軸の傾斜角を  $\phi=30^\circ$  とした。X 線エネルギーを 37 keV とし、 $0^\circ$  から  $360^\circ$  まで  $0.5^\circ$  および  $1.0^\circ$  刻みで回転させながら透過像をそれぞれ得た。試料を写さない画像である参照画像を取得する必要がある。この参照画像はサンプルを下げることによりアクリルチューブのみを透過する画像を得た。屈折コントラストの影響を検討するために、サンプル-カメラ間距離  $L$  は 250 mm および 350 mm と二種類の距離について撮影した。サンプルの透過像および参照画像の露光時間はそれぞれ 10 秒および 6

表 1. 供試鋼の代表的な化学成分 (mass%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr
SUJ2	1.00	0.35	0.47	0.006	0.017	1.50



(a) ラミノグラフィの観察領域の概要



(b) 測定装置の外観

図 1. ラミノグラフィ

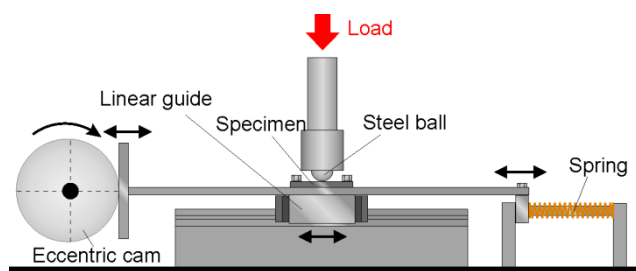


図 2. 転動疲労試験機の概要

秒とした。

### 2.3 き裂深度計による転動疲労き裂の簡易評価に関する検討

転動疲労き裂の有無を簡易評価できれば CT またはラミノグラフィによる観察を効率化することができる。転動疲労試験過程における、ボール摺動痕を中心としてき裂深度計による測定を行った。き裂深度計とは交流電流を用いた電位差法によりき裂の深さ方向の長さを測定する装置である。き裂深度計によれば表面付近に存在する転動疲労き裂を検出できる可能性がある。

転動疲労試験を中断してき裂深度計で測定を行い、同一箇所を 3 回測定し、その平均値を測定値として用いた。ヘルツ応力を 4.64GPa とし、 $1 \times 10^5$  cycles ごとに測定を行った結果を図 3 に示す。図 3 よりフレーキングが発生した繰返し数の半分程度の繰返し数からき裂深度計の反応が現れ、その後繰返し数とともにき裂深度計で得られるき裂深さの値が大きくなっていくことが分かる。き裂深度計の反応をもとに、き裂深度計の反応前、フレーキング前でき裂深度計のき裂深さが検出された状態、およびフレーキング時の三種類の試験片を用意した。

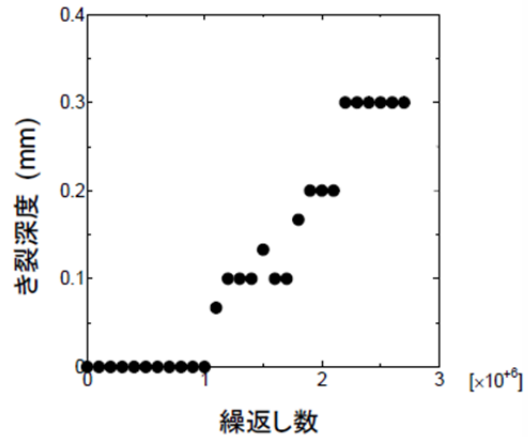


図 3. 転動疲労試験中のき裂深度計による測定値の変化

### 結果および考察：

#### 3.1 実験結果

試験片厚さ  $t=0.4$  mm の試験片について、ヘルツ応力を 4.64GPa とし、転動疲労試験およびき裂深度計による測定を行った。き裂深度計の反応に応じて転動疲労試験を中断した三種類の試験片についてラミノグラフィによる観察を行った結果の例を図 4 に示す。図 4 では二値化処理によりき裂のみを表示しており、転動面上部からの鳥瞰図、および断面図をそれぞれ示している。図 4(a) はき裂深度計の反応が見られない状態で転動疲労試験を中断した試験片に対して観察を行った結果を示している。図 4(a) より転動面の背面側から垂直に、摺動方向に沿ってき裂が発生していることが分かる。次にき裂深度計の反応が見られており、フレーキング発生前で疲労試験を中断した試験片の観察結果を示した図 4(b) から、背面からの転動面に対して垂直なき裂、および試験片厚さ方向の中央付近に転動面に対して斜めなき裂がそれぞれ発生していることが分かる。背面からのき裂と斜めなき裂はほとんどの部分ではつながっておらず、背面からのき裂が分岐して進展したものではないと考えられる。

フレーキングが生じた試験片に対する観察結果である図 4(c) から、図 4(b) で見られた転動面に対して斜めなき裂が成長し、さらに斜めなき裂

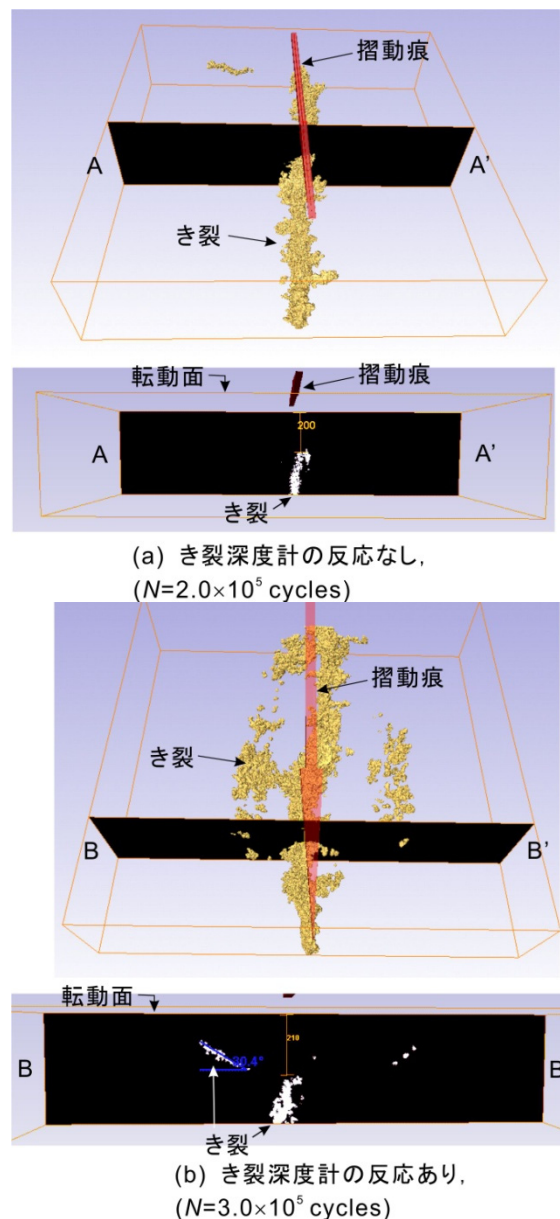


図 4. ラミノグラフィによる転動疲労き裂の観察結果 (Continued)

の間に短いき裂が発生・進展していることが分かる。この短いき裂が表面に現れてフレーキングとなっている。

また  $t=0.5\text{mm}$  の試験片についても同様の検討を行ったところ、背面からのき裂および内部のき裂進展において同様の傾向が得られた。

### 3.2 考察

本課題実験で用意した試料では、まず転動面の背面からき裂が発生し、転動面側の試料内部において転動面に対して斜めのき裂が発生・進展後、フレーキングが現れる様子が観察された。通常の転動疲労では、このような転動面の背面からのき裂の発生は想定していなかった。この転動面の背面のき裂は、試験片の厚さが小さいため転動ボールの接触圧により試験片に曲げが生じることにより発生した可能性がある。

転動面付近のき裂およびフレーキングとなったき裂は、背面から転動面に向かって進展

したき裂ではなかった。転動面付近のき裂は、転動面の背面のき裂が発生したことによる影響によりそれぞれ発生したものと考えられる。本課題実験では、厚さが小さな試験片に特有の転動疲労き裂の進展挙動が観察されたものと考えられる。薄い板材やコーティング部材における転動疲労において同様のき裂進展挙動が見られる可能性が考えられる。

き裂深度計については、背面のき裂ではなく、転動面の表面近傍のき裂に反応していることが分かった。このようにき裂深度計による簡易評価とラミノグラフィを組み合わせることにより、転動疲労試験におけるき裂の発生・進展挙動を効率的に評価できることが明らかとなった。

今後は、背面からのき裂発生を抑制することにより、試験片形状の影響を受けない転動疲労き裂進展挙動を観察する予定である。

### 参考文献：

- [1] 牧野泰三 他, 2012A 期 重点産業利用課題報告書(2012), 2012A1596.
- [2] 牧野泰三 他, 2012B 期 重点産業利用課題報告書(2012), 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] 佐野雄二 他, 2011B 期 重点産業利用課題報告書(2012), 2011B1861
- [5] 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.

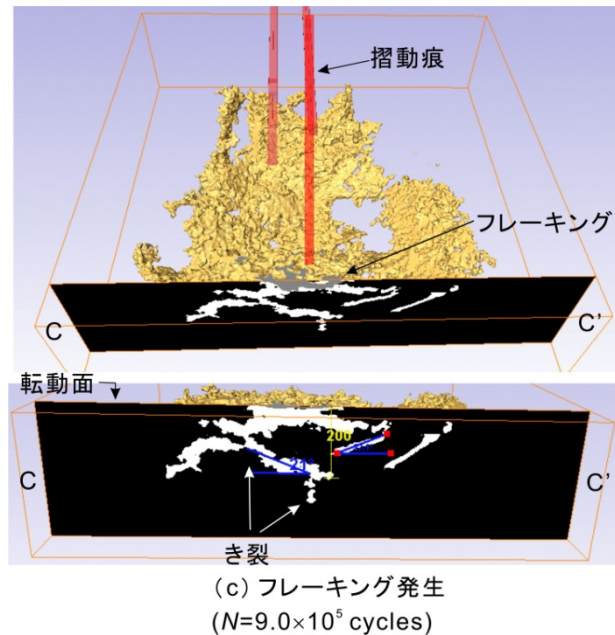


図4. ラミノグラフィによる転動疲労き裂の観察結果