

放射光ラミノグラフィによる
介在物起点の転動疲労き裂進展挙動の観察
**Observation of Initiation of Rolling Contact Fatigue Crack from Inclusion
by SR Computed Laminography**

牧野 泰三^a, 根石 豊^a, 中井 善一^b, 塩澤 大輝^b
Taizo Makino^a, Yutaka Neishi^a, Yoshikazu Nakai^b, Daiki Shiozawa^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.

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。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。そこで放射光ラミノグラフィを用いて板状試験片について転動疲労試験とその観察を行った結果、板厚の小さな試験片では転動疲労き裂の発生・進展挙動に試験片の薄さの影響が現れることが明らかとなった。本課題実験では、より板厚が大きな試料を観察することを目的として、BL46XU ビームラインを用いて放射光ラミノグラフィを用いることを検討した。フレーキングが生じた試料について、BL46XU でラミノグラフィにより損傷部周辺を観察した結果、1 mm 厚さの試料についても内部に進展する転動疲労き裂を観察することが可能であることが分かった。次に転動疲労試験機とラミノグラフィ観察を繰返し、転動疲労き裂の発生過程の観察を行った。その結果、転動面に接する介在物から転動面に対して垂直に深さ方向へ、さらに摺動方向に対して垂直に進展するき裂を検出した。このようなき裂は介在物を模擬した人工欠陥を用いた実験でも観察されており、転動疲労初期のき裂であると考えられる。

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 2013A 期では放射光 CT (Synchrotron radiation computed tomography: SRCT)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)[4, 5]の適用を検討したところ、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[6]。しかしながら、板厚が薄い場合では転動面の反対側からき裂が発生することが判明し、このき裂が転動疲労き裂の発生および進展に影響を与えることが分かった。この背面のき裂を伴う転動疲労は薄い試験片特有の破壊メカニズムであると考えられるため、より厚い試料に対して本手法を適用する必要がある。そこで本課題実験では、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 において放射光ラミノグラフィを用いてき裂の観察を行うことを検討した。

BL46XU で観察可能な試験片厚さおよび測定条件の検討を行い、次に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で転動疲労き裂の発生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

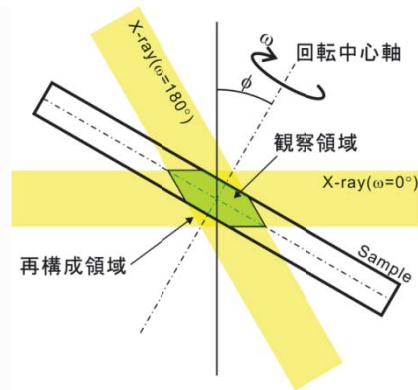
試験片およびラミノグラフィの概要図[4, 5]および外観写真を図 1 に示す。ラミノグラフィでは図 1 に示すように試験片および CT 観察用回転ステージを ϕ だけ傾けて設置し、この状態で回転ステージを回転させながら透過像を取得する。図 1(a)はわかりやすくするため、試料を固定したと仮定して、X 線入射軸を回転させた場合の透過 X 線の断面図を示している。360°回転させた場合、同図の $\omega=0^\circ$ から 180° の範囲で X 線入射軸が変化するため、全ての角度において X 線が透過する領域ができる。この領域に関する透過像を画像処理により作成して画像再構成を行うと、観察領域の断面画像が得られる。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 インゴットを溶製した。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 24 mm×10 mm の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。

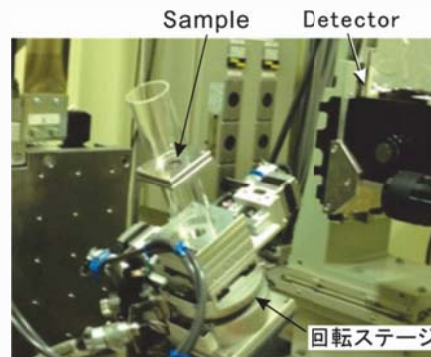
BL46XU ビームラインにおいて放射光ラミノグラフィの測定を行った。BL19B2 ビームラインの線源は偏光磁石であるのに対して、BL46XU はアンジュレータを線源としており、より輝度が高い放射光の利用できることから、より厚い試料に対しても短い露光時間での撮影が可能になるものと考えられる。2013A 期までの実験での試験片厚さ $t=0.5$ mm から、 $t=0.8$ mm, 1.0 mm および 1.5 mm の 3 種類のより板厚の厚い試験片を用意した。試料厚さの大きな試料に対する、ラミノグラフィによる転動疲労き裂の検出への適用性を検討するために、転動疲労において内部起点のき裂が進展して損傷したはく離(フレーキング)を有する $t=1.0$ mm の試料と、SPring-8 に持ち込む前に予め転動疲労を行った、フレーキング前の $t=1.0$ mm の試料の二種類を用意した。フレーキング前の試料に対して SPring-8 において転動疲労試験と SRCL を繰り返すことにより、転動疲労き裂

表 1. 供試鋼の代表的な化学成分(mass%)

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



(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

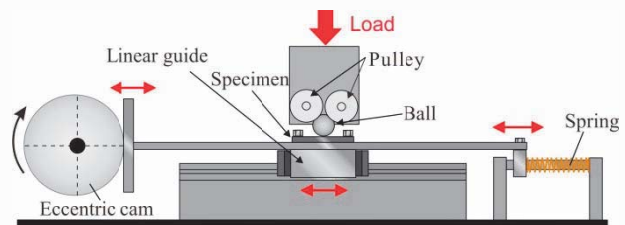


図 2. 転動疲労試験機の概要

の進展過程を観察する。試験片の厚さを $t=1.0\text{ mm}$ と大きくした場合には、 $t=0.5\text{ mm}$ で問題となった転動面の背面からのき裂は発生しなかった。

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。

2.2 ラミノグラフィ観察条件

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 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 $0.74\text{ }\mu\text{m}$ 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 および 60 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それぞれ得た。サンプル-カメラ間距離 L は 350 mm とした。露光時間は 37 keV では 4 秒である。

結果および考察：

3.1 実験結果

放射光ラミノグラフィ(SRCL)による転動疲労き裂の検出への適用性を検討するため、最大ヘルツ応力 $P_{\max}=6.44\text{ GPa}$ 、繰返し数 $N_f=1.00\times 10^7\text{ cycles}$ でフレーキングが生じた、試験片厚さ $t=1.0\text{ mm}$ の試料について撮影を行った。SRCL の再構成像を図 3 に示す。図 3(a)は転動面に平行な断面でのフレーキング部の再構成像であり、図 3(b)は線 A-B での断面図である。図 3 よりフレーキング部の右側の転動面内部において摺動方向に進展したき裂が存在していることが分かる。これらのき裂ははく離しなかった転動疲労き裂の一部だと考えられ、BL46XU において厚さ 1 mm の試料に対して SRCL により転動疲労き裂の検出が可能であるということが分かった。試験片厚さを変化させて SRCL の撮影を行ったところ、 $t=1.5\text{ mm}$ の試料では、十分なコントラストを得るために必要な露光時間が 20 秒以上となり、き裂発生過程の観察実験には適さないことが分かった。またエネルギーを 60 keV と高くした場合には、必要な露光時間が 37 keV と比較して長くなったことから、以後 X 線エネルギーを 37 keV として観察を行った。

次に小型転動試験機を SPring-8 に持ち込み、転動疲労試験と撮影を交互に行い、転動疲労き裂の発生過程の観察を行った。最大ヘルツ応力 $P_{\max}=6.84\text{ GPa}$ の試験条件において繰返し数 $N=4.31\times 10^6\text{ cycles}$ 時における SRCL 再構成像の一例を図 4 に示す。図 4 は転動面に平行で表面から深さ $50\text{ }\mu\text{m}$ での断面像であり、介在物からき裂が発生していることが分かる。図 4 に示したき裂および介在物の三次元像を図 5 に示す。図 5 では $N=3.32\times 10^6\text{ cycles}$ および $N=5.04\times 10^6\text{ cycles}$ における観察結果を表示している。図 5 より転動面に対して垂直方向(z 軸)に延伸した介在物に沿って疲労き裂が深さ方向に発生し、転動方向(x 軸)に対して垂直方向(y 軸)に進展していることが分かる。また繰返し負荷により、点線で示した部分においてき裂の進展が観察された。このような介在物に沿って発生するき裂は介在物を模擬

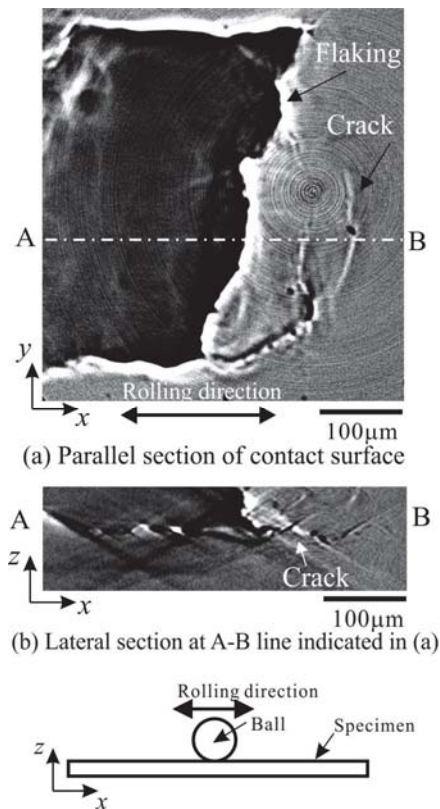


図 3. SRCL 再構成結果：
($P_{\max}=6.44\text{ GPa}$, $N_f=1.0\times 10^7\text{ cycles}$)

した人工欠陥を用いた試験においても見られた[1, 7]. 人工欠陥から転動面に対して垂直なき裂と転動面に平行なき裂が観察され、転動面に平行なき裂はフレーキングに至るせん断型なき裂であり、転動面に垂直なき裂は転動疲労なき裂の進展に影響を与えるものと考えられた[8]. 実験時間の都合上、今回の撮影ではフレーキングまでのき裂進展挙動を観察することはできなかった. 転動疲労なき裂発生初期と考えられるなき裂を検出できたことから、SRCL および転動疲労試験機を用いることにより転動疲労なき裂の発生および進展のメカニズム解明が可能になるものと考えられる.

参考文献：

- [1] 牧野泰三 他、2012A 期 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2012), 2012A1596.
- [2] 牧野泰三 他、2012B 期 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(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 重点産業利用課題成果報告書(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.
- [6] 牧野泰三 他、2013A 期 重点産業化促進課題・一般課題 (産業分野) 実施報告書(2013), 2013A1786.
- [7] 佐藤一矢 他、日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス(2013), OS1504.
- [8] T. Makino et al., Proceedings of the 4th International Conference on Crack Paths (CP2012), Gaeta, CD-ROM, 2012.

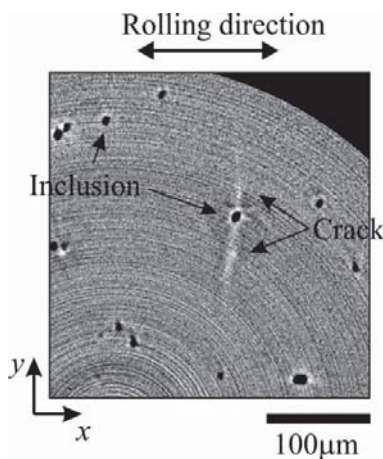


図 4. 転動疲労試験によるき裂の変化の観察: ($P_{max}=6.84$ GPa, $N=4.31\times 10^6$ cycles)

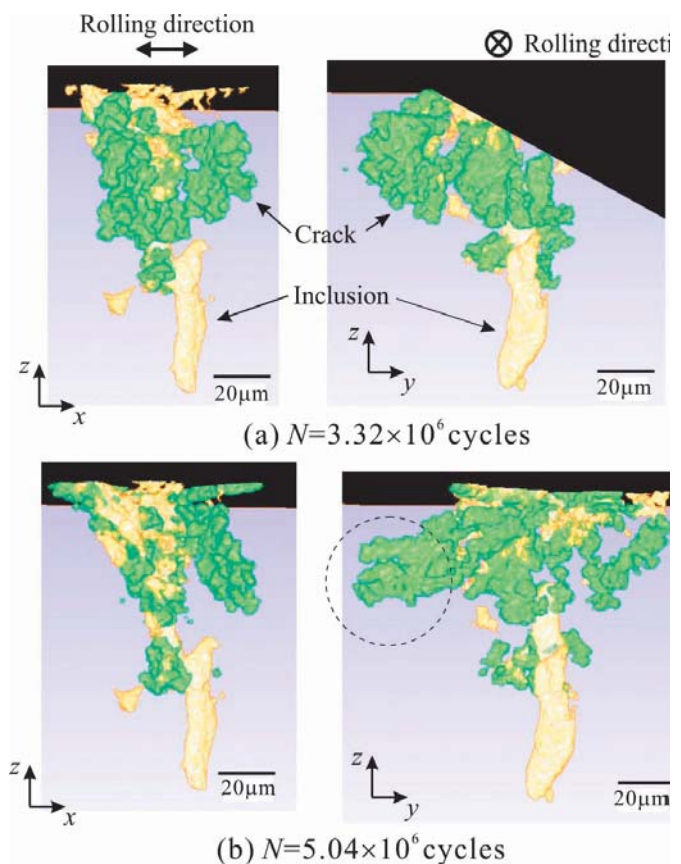


図 5. SRCL によるき裂形状の変化の観察 : ($P_{max}=6.84$ GPa)