

ラミノグラフィによる介在物を起点とした転動疲労き裂の進展
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^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。さらにサンプルの繰返し着脱が可能な転動疲労試験機を用いて、SPring-8 においてき裂発生前から測定と疲労試験を繰り返すことにより、介在物を起点とした転動疲労き裂の発生過程を観察することが可能であ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。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。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、同一の試験片について転動疲労き裂の発生と進展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 の短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。SPring-8 での実験前に得られた予想破断繰返し数をもとに撮影間隔を決定した。ヘルツ圧 P_{max} が 6.59 GPa の場合では、 6.5×10^5 cycles ごとに試験を中断し、ラミノグラフィ観察を行った。

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.

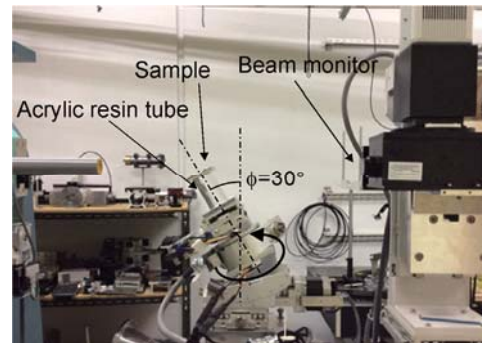


図 1. ラミノグラフィ測定装置の外観

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 μm 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° から 360° まで 0.3° および 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 4 秒である。

結果および考察：

3.1 実験結果

負荷繰返し数 $N=1.33 \times 10^6$ cycles と $N=1.96 \times 10^6$ cycles における同一視野を含む SRCL および電子顕微鏡(SEM)観察結果を図 2 に示す。この図では、転動面表面近傍の、転動面に対して平行な断面像を示しており、図中の点線は二つの画像で同一箇所にあたる位置である。図 2 よりき裂の発生前と発生後の様子が観察されていることが分かる。また図 2(c)に示したように SEM 観察結果においてもラミノグラフィ観察結果と同様の形状のき裂が確認された。図 2(b)では、き裂の中央に介在物が見られ、この介在物がき裂の起点となった可能性が考えられる。

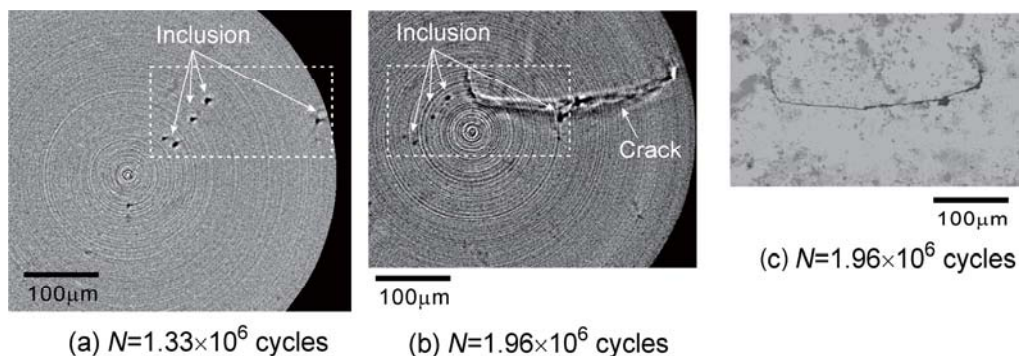


図 2. き裂発生過程の観察結果(a), (b): SRCL による表面の再構成結果, (c)SEM 観察結果)

図 2(b)に示したき裂の 3 次元形状を図 3 に示す。この図では、転動試験の模式図に示したように各方向から見た外観図を示している。摺動方向を x 軸、試験片幅方向を y 軸、試験片厚さ方向を z 軸とした。表面からは摺動方向である x 軸に伸びたき裂(Crack 1)のみが観察されたのに対して、内部には y 軸に伸びたき裂(Crack 2)が見られた。Crack 2 は表面には達しておらず、試験片深さ方向の z 軸に約 45° の傾きを有して進展していた。図 3 より、図 2 でき裂の起点と見られた介在物の先端は表面に接しており、複数の介在物が連結して深さ約 $100 \mu\text{m}$ まで伸びた形状をしていることが確認された。さらに、き裂発生前の観察結果から得られた、Crack 1 の起点となったと見られる介在物およびき裂が発生しなかった介在物を含む断面像を図 4 に示す。図 4 では xz 断面を示しており、上方が試験片表面側となっている。Crack 1 の起点となった介在物は、図 4(a)より、表面における直径は約 $8.5 \mu\text{m}$ 、直径が最大値は約 $17.8 \mu\text{m}$ であり、三つの介在物が深さ方向に連なった分布となっていることが分かる。今回の観察において同じ視野内でき裂が発生しなかった介在物では、図 4(b)に示したように介在物の先端が表面に接しているが、介在物の直径はき裂が発生した場合と比較して小さく、直径の最大値は約 $8.9 \mu\text{m}$ であった。一方、Crack 2 付近には介在物が見られなかったことから、Crack 1 が発生し、進展した影響により、Crack 2 が発生したことが考えられる。これまでに介在物から発生するき裂は Crack 2 のように y - z 平面にき裂面を形成するものが多く観察された[4]のに対して、Crack 1 では x - z 軸にき裂面を形成するように進展する様子が見られた。Crack 1 は摺動痕の幅方向の中央、すなわち転動球の直下に発生した。転動球の接触面内でも場所によって接触による内部応力状態が異なるため、応力状態の違いがき裂進展方向に影響を与えている可能性がある。

これらの結果から小型転動疲労試験機とラミノグラフィを組み合わせることにより、同一のサンプルについてき裂発生過程を観察できることが明らかとなった。本実験ではき裂発生過程を観察することにより、き裂の起点となる介在物形状を取得することができた。今後は、さらに詳細なき裂進展挙動を観察するとともに、き裂発生および進展挙動と介在物の寸法および形状の関係について調べる予定である。

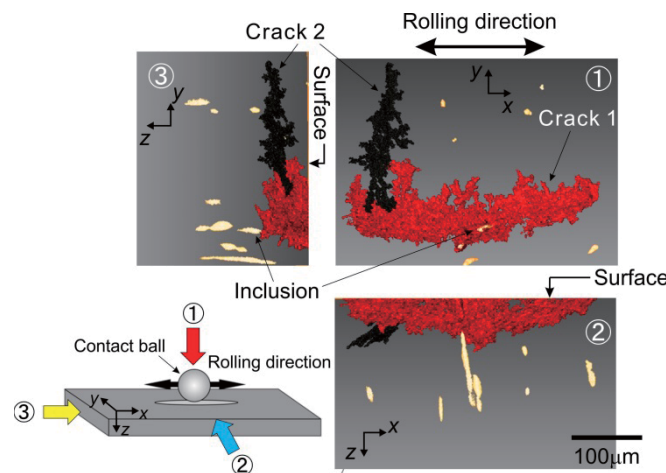


図 3. 転動疲労き裂および介在物の 3D イメージ像

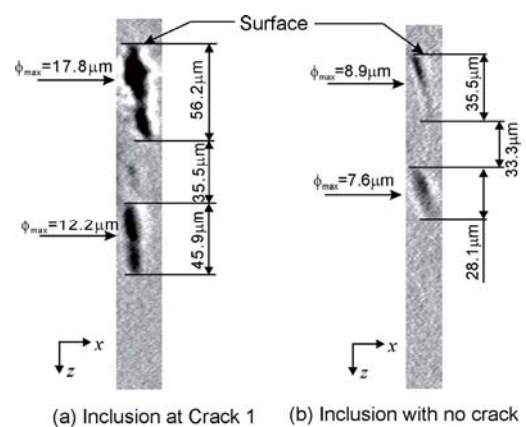


図 4. 介在物の形状および寸法

参考文献：

- [1] 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(2012A), 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.