

# 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

新日鐵住金(株) 技術開発本部 牧野泰三, 根石豊

神戸大学大学院 工学研究科 塩澤大輝, 菊池将一, 宇都裕貴, 小濱友也, 佐藤一矢, 中井善一

## 1. はじめに

軸受用途を想定した転動疲労試験では、油浸漬純転がり条件下で行われるため材料内部の非金属介在物を起点に疲労き裂が発生、進展し、はく離に至ることが知られている。このような材料内部の損傷プロセスを理解するには、非破壊による直接観察が有効である。著者らは以前より転動疲労損傷を対象にSPring-8において $\mu$ CTイメージングによる観察<sup>1,2)</sup>を行ってきたが、X線で試験片全断面を透過する必要があることから、鉄鋼材料では観察部断面の厚さが最大0.7mm程度(例えば矩形断面の場合0.5mm×0.5mm)といった形状制約があり、そのままの形状で転動疲労試験を行うことが困難であった。本報告では、上記問題を解決するため、放射光ラミノグラフィ(SRCL)をより高輝度のX線が得られるSPring-8のBL46XUに適用して、転動疲労の損傷過程の直接観察を行った。

## 2. 供試材および実験方法

供試材は軸受用鋼SUJ2をベースとし、介在物を増量させるため意図的に多量のS量(0.017%)を添加したものである。これを素材圧延方向が試験片転動面法線方向となるように、試験片を採取した。よって材料内部において硫化物系延伸介在物が転動面から深さ方向に配向した状態となっている。試験片形状はW10mm×L24mm×t1.0mmである。SRCLは、図1にその原理を模式的に示すように、板状試験片をX線入射方向に対し、傾けて回転させながら逐次撮影する手法であり、試験片におけるX線入射位置近傍のみについて透過像を得ることから、板厚以外の寸法制約がない。図2にBL46XUにおけるSRCLの実施状況の写真を示す。板厚については、BL46XUにおいて観察条件を調整した結果、X線エネルギー37keV、サンプルカメラ間距離350mm、試験片回転軸傾き( $\phi$ ) $30^\circ$ とする条件にて、1.0mmの板厚で観察可能であることが判明した。

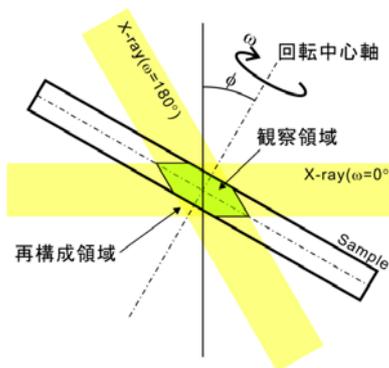


図1 SRCLの原理模式図

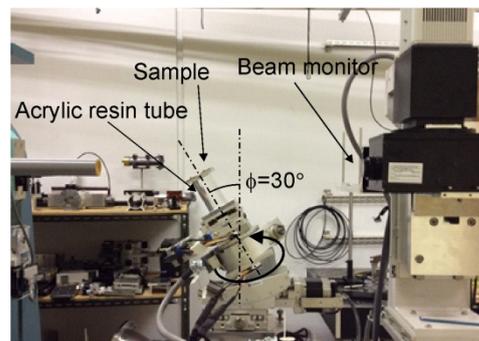


図2 SPring-8/BL46XUにおけるSRCLの実施状況

## 3. 実験結果

図3は、森式と呼ばれるボールオンディスクタイプの転動疲労試験で、 $\phi 60$ mm×t5mmの円盤上試験片に生じたはく離部(図にはフレーキングと表記)を、上記したt1mmの試験片形状に切り出して、SRCLに適用した結果である。同図(a)に示すように、はく離の近傍に介在物とその両側に生じたき裂が確認された。この部分を拡大して、(b)に示す3次元再構成像を得た。これより、転動面表面から垂直(深さ)方向に伸びた介在物の両側に、き裂が転動方向に垂直かつ、介在物の伸長方向に沿った方向に進展した形状となっていることがわかる。この試験片を、シリアルセクションングと呼ばれる逐次研磨による多数の観察像を再構成する破壊的手法を適用して、同一部分を評価した。得られた再構成像を同図(c)に示す。(b)と(c)の比較より、SRCLによって非破壊的に得られた像が、シリアルセクショニ

ングによる破壊的に得られた像と良く対応していることがわかる。この結果は SRCL が同一試験片を用いて非破壊的に転動疲労損傷の蓄積、すなわちき裂の発生～進展～はく離までの過程を逐次準その場観察できる有効な手法であることを示唆している。

図 4 は、1mm の同一試験片について往復動型の転動疲労試験と SRCL を繰り返し行った結果である。これより、介在物周囲にき裂が発生し、繰返し数とともに進展していることがわかる。本資料では省略するが、別の試験片について、図 4(b)に近い形態からさらに表面に平行なき裂が発生・進展し、最終的にははく離に至った観察像も得られている。このような観察結果を基に作成したモデルを用いて有限要素解析を行い、介在物からき裂が発生・進展する機構を力学的に考察することが可能であり、著者らも一部実施中である<sup>(2)</sup>。また、観察像の中にはき裂が発生しなかった介在物も確認されており、これとき裂が発生した介在物とを比較することによって、どのような介在物であればき裂が発生し難いのか明らかにできる可能性がある。

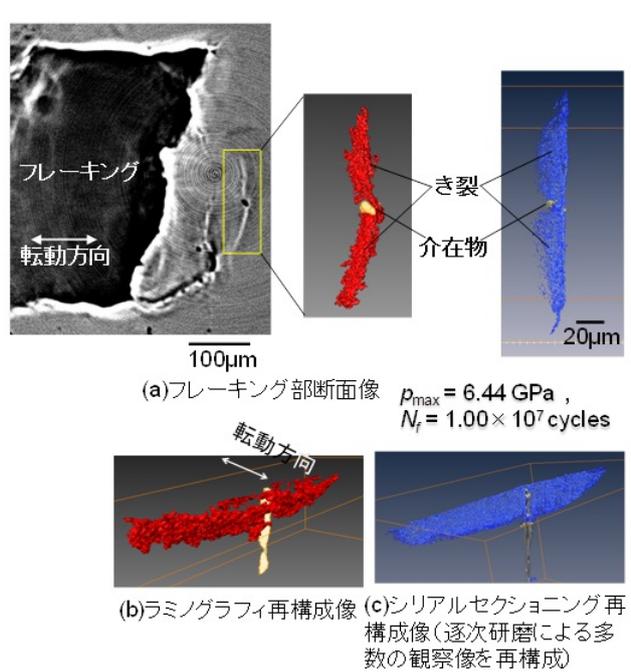


図 3 転動疲労はく離部の SRCL による観察結果とシリアルセクションングによる評価結果との比較

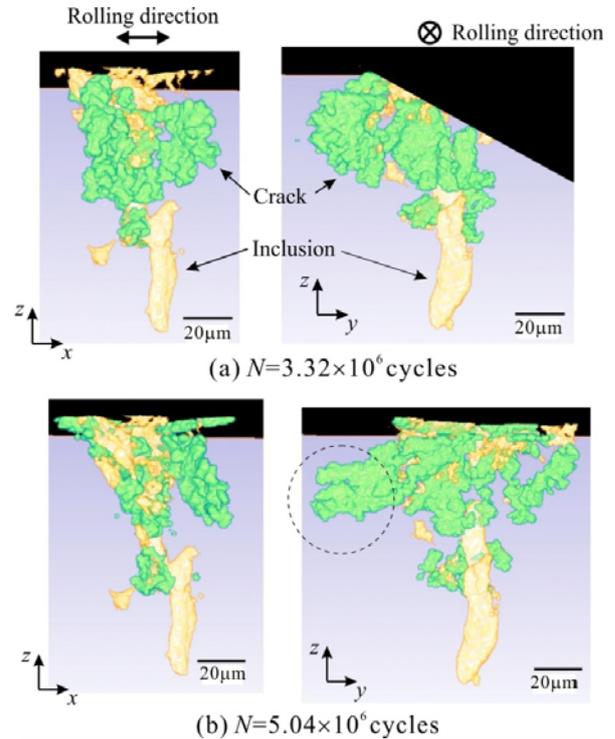


図 4 SRCL による 3D 再構成像の転動疲労試験中の変化

#### 4. まとめ

転動疲労下の材料内部の介在物を起点とする損傷プロセスを理解するために、SRCL を SPring-8 の BL46XU に適用した。その結果、1mm 厚さの板状試験片を対象に介在物とき裂の内部 3 次元形状を非破壊で計測し、これがシリアルセクションングと呼ばれる破壊的手法による実測形状と対応することを明らかにした。さらに同一試験片を対象に、転動疲労試験中に介在物からき裂が発生・進展する様子について逐次準その場観察に成功した。

本研究は、SPring-8 の産業利用課題 2013A1786, 2013B1721, 2013B1786, 2014A1562, 2014A1770 によって得られた成果である。本課題の提案・実施にあたり、多大なご支援をいただいた JASRI/橋本保コーディネーターならびに梶原賢太郎副主幹研究員に改めて謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) Y. Nakai, D. Shiozawa, Y. Fukuda, Y. Neishi, T. Makino, ICEM15, Paper Ref.2635, (2012)
- (2) T. Makino, Y. Neishi, D. Shiozawa, Y. Fukuda, K. Kajiwara, Y. Nakai, Int. J. of Fatigue, 68 (2014) 168–177