

## 放射光 X 線ラミノグラフィによる形態制御介在物分散材における 転動疲労き裂発生過程観察

### Observation of Rolling Contact Fatigue Crack Initiation Process in the Material with Dispersive Shape-controlled Inclusions by SR X-ray Laminography

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>c</sup>  
Taizo Makino<sup>a</sup>, Yutaka Neishi<sup>a</sup>, Yoshikazu Nakai<sup>b</sup>, Daiki Shiozawa<sup>b</sup> and Shoichi Kikuchi<sup>c</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>c</sup>静岡大学工学部  
<sup>a</sup>Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, <sup>b</sup>Kobe University, <sup>c</sup>Shizuoka 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、転動面に対して垂直な方向に配向する円柱形状の介在物(S方向材)や転動面に水平に配向する介在物を有する材料(T方向材/L方向材)について、き裂の発生および進展挙動を観察した。本研究では介在物の投影形状による応力集中を緩和する、球状化処理を施した介在物について、き裂の発生および進展挙動に関する調査を行った。本課題実験では球状化形態制御を行った材料の介在物から発生したき裂がはく離を形成するまでの過程を4D観察することを試みた。その結果、表面き裂は表面と垂直方向に介在物に沿って進展しており、材料内部では転動面に平行な方向に分岐したき裂が進展してはく離を形成してい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)

#### 1. 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。さらに損傷部は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)をき裂の観察手法として適用した[1][2]。これまでに転動面に垂直に配向する円柱状の介在物(S方向介在物)および、転動面に平行に配向する円柱状の介在物(T方向：転動方向に垂直に配向, L方向：転動方向に平行に配向)が存在する場合に対して、介在物の配向形態が転動疲労に与える影響について調査を行っている。観察の結果、転動面付近の介在物を起点として、転動面から深さ方向に進展するき裂(垂直き裂)が発生した後、転動面に平行なせん断型き裂が発生することが明らかとなった[3]-[7]。さらに配向形態に応じて垂直き裂の発生および進展速度が異なることが明らかとなりつつある[8]-[9]。この原因として、はく離形成過程は転動方向への介在物の投影形状と応力状態によって決まる可能性が考えられた。そこで投影形状による応力集中を緩和する球状化処理を施した介在物について、き裂発生および進展挙動の観察を行い、高強度化を達成する介在物制御指針を得ることを目的とした。2018A期には球状化処理を行った試験片(球状化介在物材)において、作成した材料の介在物の配向形態を調べた。さらに作成した試験片に対して転動疲労試験を行い、フレーキング寿命を調査するとともに、フレーキング部および表面き裂が観察された箇所についてラミノグラフィ観察によってき裂の内部分布を調べた。本課題実験では、球状化介在物材の介在物から発生したき裂の進展挙動を調べるために、ラミノグラフィ撮影を用いた4D観察を行った結果について

報告する。

表 1 供試鋼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.

## 2. 実験：

### 2.1 転動疲労試験機および試験片

介在物から発生するき裂を観察するために、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。軸受鋼 SUJ2 鋼をベースとして、多量の S 量 (0.049 mass%) を含有する鋼 (表 1) を、真空溶解炉を用いて 150 kg インゴットとして溶製した。溶製したインゴットは、熱間鍛伸により直径 70 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平行な直面 (縦断面) 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 40 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。試験片は厚さ 1 mm、幅 10 mm、長さ 24 mm の平板形状である。

円柱状介在物 (延伸介在物) および本課題実験で用いた球状化介在物のラミノグラフィ撮影結果を図 2 に示す。図 2 に示したように、介在物の長さが短い介在物が多いが、介在物が鍛伸方向に接続しているものも見られた。配向形態としては、図 2(a) に示したように、熱間鍛伸により介在物が転動面に対して垂直方向に分布する (S 方向配向) ように切り出している。

転動疲労試験は、実験者らが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、森式転動疲労試験機では一方のみ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様式である。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。最大ヘルツ圧  $P_{max}$  は 5.39 GPa とした。

### 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。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 つの検出要素を構成する 2×2 ビニングモードがあり、この時の有効ピクセルサイズは 0.60  $\mu\text{m}$  であり、4×4 ビニングモードは 1.20  $\mu\text{m}$  となる。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° から 360° まで 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 2×2 ビニングモードでは 0.6 秒、4×4 ビニングモードでは 4 秒とした。

## 3. 結果および考察

球状化介在物材に対して転動疲労き裂を行ったところ、複数の表面き裂の発生が観察され、その後、この表面き裂の一つからフレーキングが発生した。表面き裂の走査型電子顕微鏡観察結果を図 3 に示す。図 3 より転動方向に対して垂直な方向にき裂が発生し、進展していることが分か

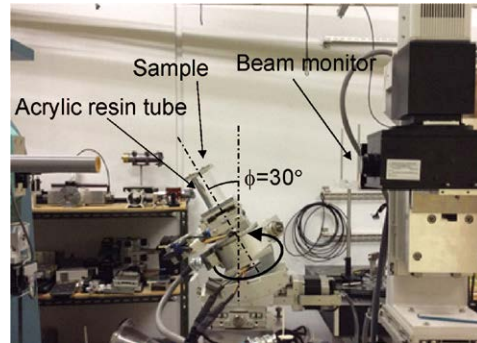


図 1 ラミノグラフィ測定装置の外観

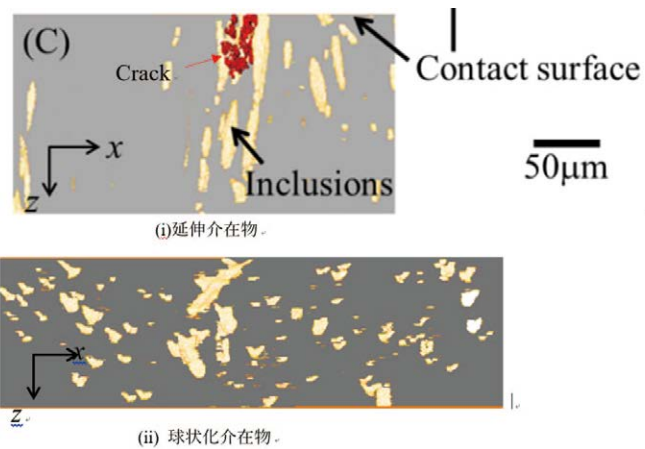


図 2 延伸介在物と球状化介在物の配向形態の違い

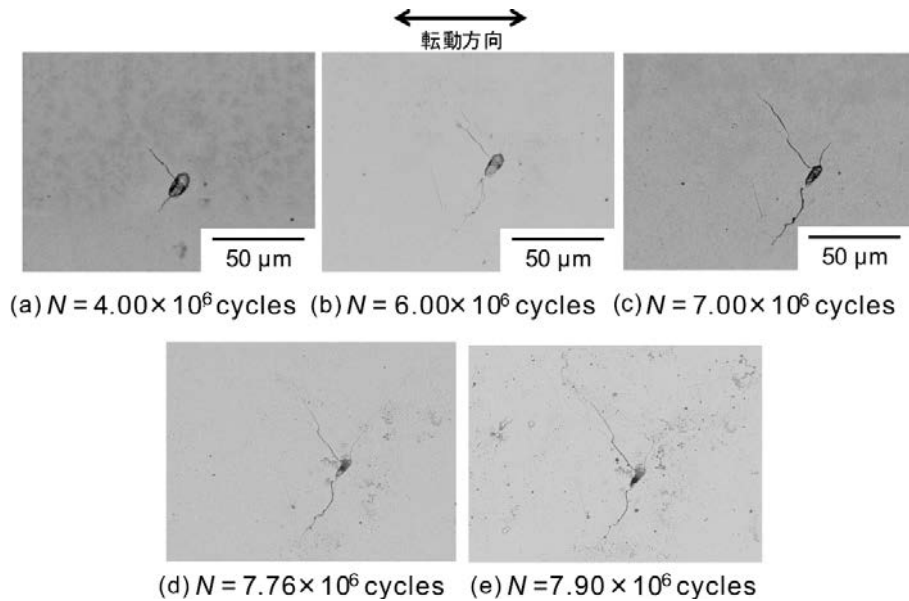


図3 転動面表面におけるき裂のSEM観察結果

った。

球状化介在物から発生したき裂進展挙動の観察を行った結果を図4に示す。図4は図3の表面き裂についてラミノグラフィ観察を行った結果であり、図4(a)では介在物を黄色で、図4(b)~(e)では撮影した負荷繰返し数ごとにき裂の色を変えて示している。図4(b)より、転動面に対して垂直方向に進展したき裂と、内部で分岐して転動面に平行に進展したき裂が存在していることが分かる。その後転動疲労試験を行いながらラミノグラフィ撮影を行ったところ、転動面に平行なき裂は繰返し数とともに進展している様子が見られた。このような進展挙動はこれまでの延伸介在物と同様であり、介在物に沿った転動面に垂直なき裂が発生・進展した後に転動面に平行なき裂が発生して進展し、はく離を形成するものと考えられる。球状化処理を施したことによって介在物の長さが短くなった場合においても、延伸介在物と同様に、介在物に沿った転動面に垂直なき裂が発生・進展した後に転動面に平行なき裂が発生するという、はく離形成挙動を示すことが明らかとなった。

#### 4. 今後の課題：

介在物形状の制御による軸受鋼の高強度化への指針を得るために、球状化処理の効果を検証する。本課題実験では、球状化介在物材から発生したき裂の内部進展挙動をラミノグラフィにより観察した。その結果、これまでの延伸介在物に発生したき裂と同様に、転動面に垂直なき裂が表面から進展し、内部で転動面に平行なき裂が分岐し成長することによりフレーキングが形成されることが分かった。また、転動疲労試験前に転動痕の全領域について介在物の分布形態を撮影した。この試験片に対して転動疲労試験を行うことにより、表面き裂が発生する介在物を特定する予定である。これにより、表面き裂およびはく離の起点となる介在物の形状および寸法について定量的に評価し、球状化による長寿命化の効果について検討を行う予定である。

#### 参考文献：

- [1] 佐野雄二 他，平成 23 年度 SPring-8 重点産業利用課題報告書(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)，pp.207-210.
- [3] 牧野泰三 他，平成 25 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・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] T. Makino et.al. *International Journal of Fatigue*, vol. 68(2014)，pp. 168-177.
- [6] 牧野泰三 他，平成 26 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題（産業分野）実施報告書(2014A)，2014A1562.
- [7] 齋藤仁史 他，M&M2016 材料力学カンファレンス(2016)，pp. 771-772.

[8] 牧野泰三 他, 平成 28 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題 (産業分野) 実施報告書 (2016B), 2016B1589.

[9] 仁科 多可志 他, M&M2017 材料力学カンファレンス(2017), pp.516-518

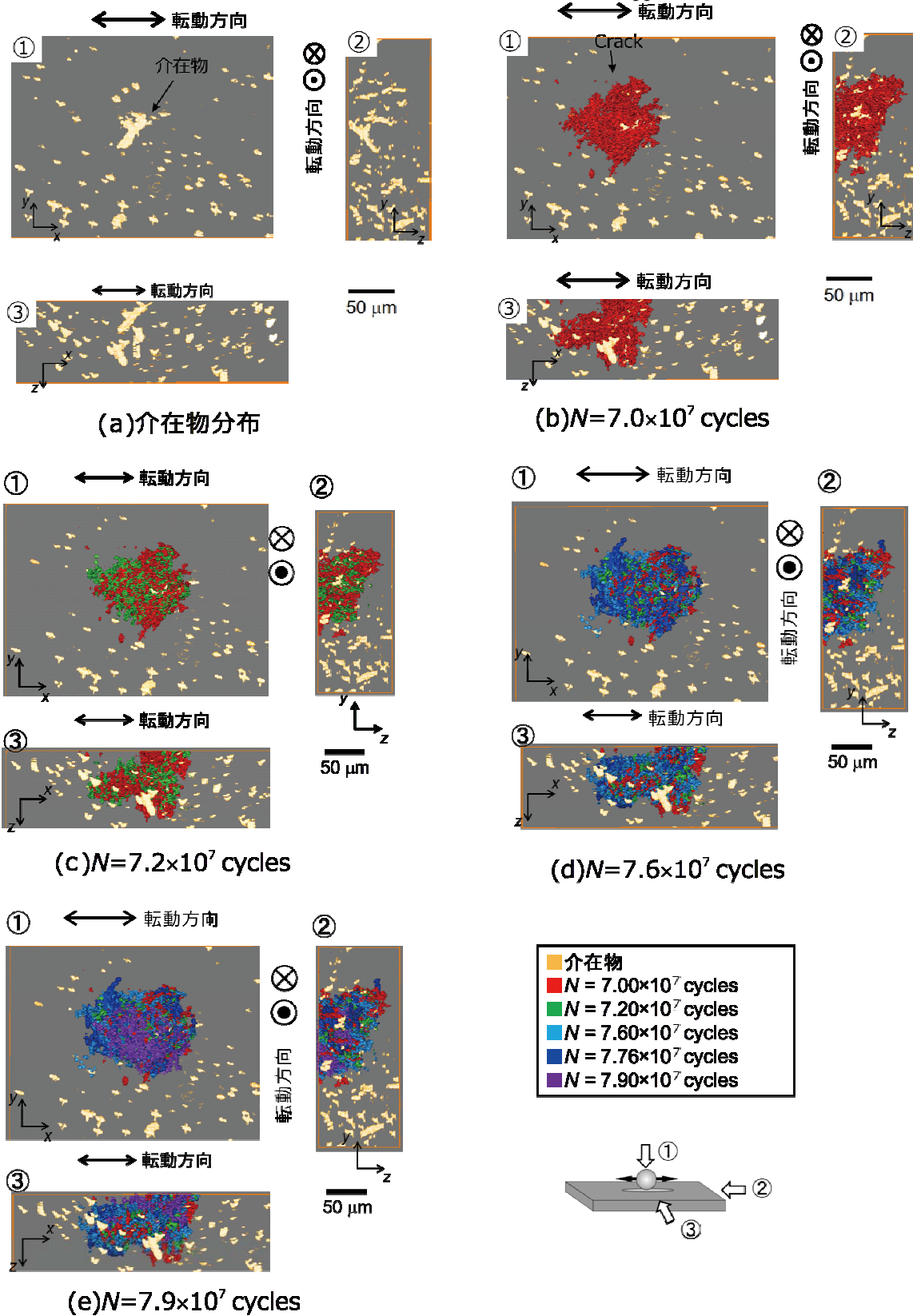


図4 ラミノグラフィによる内部き裂進展観察結果