

## 高強度鋼の転動疲労き裂進展挙動のその場観察 In-situ Observation of Rolling Fatigue Crack Propagation Behavior in High-strength Steels

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 $\mu$ CT 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試みた。本課題実験では、実際の介在物から発生するき裂を観察するために、介在物を多く含むよう調質した材料について開発した試験機を用いて転動疲労試験を行い、*S-N* 曲線を作成した。この *S-N* 曲線で得られた疲労寿命をもとに、き裂進展を観察するための CT 撮影を行う負荷繰返し数を設定した。CT 観察用の試験片では、観察領域を小さくしない通常の試験片と比較して、短寿命で破断した。破断した試験片を CT 観察した結果、転動面に平行なき裂ではなく、転動面に対して角度を有した斜めき裂により破断が生じていることが分かった。次に転動疲労試験を中途止めして CT 観察を行ったところ、介在物分布を確認することはできたが、き裂を観察することはできなかった。

キーワード： Rolling Fatigue, CT Imaging, High-strength Steels

### 背景と研究目的：

自動車等の輸送機器には軸受、等速ジョイント、ホイールハブ等、長期間転がり接触を受ける(転動)部品が数多く使われている。これらの転動部品では、転動面直下に存在する内部介在物を起点に、その周囲に組織変化をともしつつき裂が発生・進展し、はく離に至ること(転動疲労)が知られている。転動疲労寿命の向上には、高纯净度化による介在物寸法の低減や基地組織の高強度化など各種因子が挙げられているが、その影響を直接的な観察に基づいて論じたものはほとんどない。この理由としては、転動疲労ではき裂が内部に発生すること、はく離して寿命に到達した段階ではそのはく離が転動によってつぶれ、直接的かつ詳細な観察が難しいことが挙げられる。そこで本研究では 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。これまでの課題実験では、破損後や疲労試験を中途止めした試験片から切り出した観察用試料について CT 観察を行っていた[1-4]。そこで本研究では、CT 観察が可能な試験片とこの試験片のための転動疲労試験片を開発した。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ている[5]。これまでに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た。そこで本課題実験では、実際の介在物からの転動疲労き裂の発生過程を観察するために、転動疲労試験による *S-N* 曲線を作成し、疲労寿命から観察する負荷繰返し数を決定した。転動疲労試験装置の開発を行い、この疲労試験装置を用いた転動疲労進展過程の観察スキームを構築することを目的とする。

### 実験：

#### 2.1 転動疲労試験機および試験片

試験片形状および転動疲労試験機の概要図を図 1 および図 2 にそれぞれ示す。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(0.017mass%)を含有する SUJ2 鋼を、真空溶解炉を用いて 150kg 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 60mm の棒鋼に加工し, 更に球状化焼鈍処理を施した後, 転動疲労評価面が棒鋼の長手方向に対して垂直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 30min の焼入れ処理と, 加熱温度 180°C, 均熱時間 120min の焼戻し処理を行った. さらに放電加工により板材から図 1 に示すような試験片形状を切り出した. CT 観察用試験片である Type II では, CT 観察部位である試験片中央は, 放射光が透過する厚さである 0.5mm×0.5mm の正方形断面とした. Type II では平行部長さを 1mm としており, 実際の介在物から発生する転動疲労き裂の観察を目的とした. Type I 試験片は厚さ 0.5mm の板状試験片であり, 転動疲労試験の性能の検証および二つの試験片の結果を比較することにより Type II の観察部位の幅を小さくした影響を検討した.

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

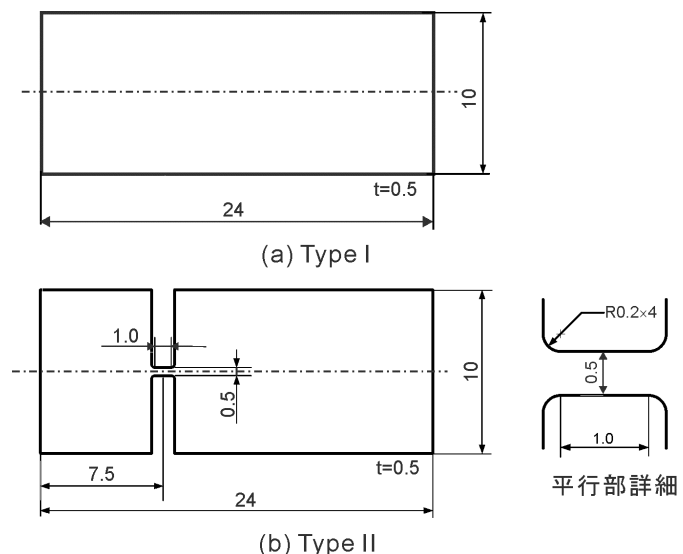


図 1. 試験片形状

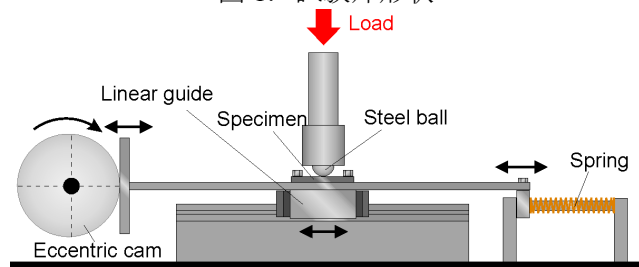


図 2. 転動疲労試験機の概要

転動疲労試験は, 新たに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撻動するのに対して, 本疲労試験機では試験片の CT 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 6.0mm の鋼球を用いており, ボールの撻動距離は 3mm である. 偏心カムの回転速度では 1000rpm で試験が可能である.

## 2.2 CT 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. X 線エネルギーを 37keV, 0°から 180°まで 0.2°刻みで回転させながら合計 948 枚の透過像を得た. 屈折コントラストを利用するため, サンプル-カメラ間距離は 350mm とした. Type I 試験片では, 検出器の有効ピクセルサイズは 0.74 $\mu$ m とし, 1 枚の撮影における露光時間は 12 秒とした.

## 結果および考察:

### 3.1 Type I 試験片

Type I 試験片に対する S-N 曲線を図 3 に示す. ヘルツ応力  $p_{max} = 3.89$  GPa の破損後の試験片の SEM 観察結果を図 4 に示す. 図 4(b)は表面観察結果(図 4(a))の A-A'切断面の観察結果を示している. 転動疲労では転動面の表層部がうろこ状にはがれるフレーキングと呼ばれる損傷が主に生じる. 図 4(a)より, 表面において撻動方向に垂直なき裂とフレーキング直前と考えられるき裂が生じていることが分かる. また図 4(b)に示した切断面においては, 転動面の直下では転動面に平行なせ

ん断型き裂が  $50\mu\text{m}$  および  $120\mu\text{m}$  の深さに、斜めのき裂がその間の深さにそれぞれ現れていた。ヘルツ応力を変えて実験を行った場合においてもこれらのき裂が観察されており、転動面に平行なせん断型き裂はヘルツ応力が大きくなるほど深い位置に現れた。Type II 試験片において同じヘルツ応力で転動疲労試験を行った破損後の試験片の SEM 観察結果を図 5 に示す。Type II の破断繰返し数は  $N_f = 1.56 \times 10^6 \text{cycles}$  であった。図 5 より、Type II 試験片では観察部位において破断していることが分かる。また表面においては摺動方向に垂直なき裂および断面に大きな凹凸が存在していることが分かる。破面観察結果を示した図 5(b)においても、断面の凹凸および断面において転動面に平行と見られるき裂が現れている。

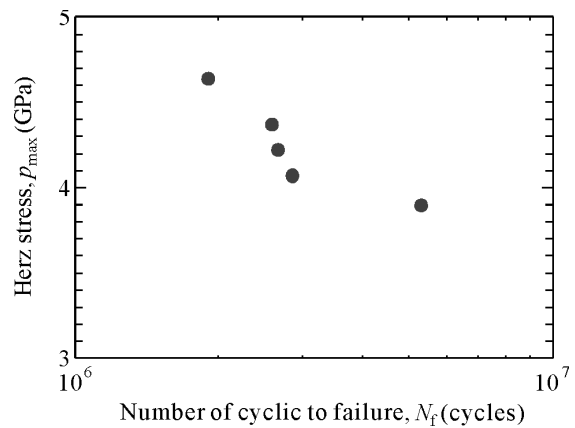


図 3. S-N 曲線

Type II 試験片の破面観察で見られた破面上のき裂の内部形状を観察するために CT 観察を行った。再構成断面像を図 6 に示す。図 6(b)より破面上に見られたき裂は内部では転動面に対して角度を有しており、破面の凹凸と同じ大きさの角度であることが分かる。また表面とつながるき裂と内部のき裂が合体する位置やき裂面上に、介在物と考えられる像が見られる。この CT 観察より Type II 試験片では斜めのき裂が発生・進展することにより破断が生じているものと考えられる。Type I では転動面に対して斜めのき裂と平行なき裂がともに観察され、フレーキングの深さと転動面に近い平行なき裂の深さが一致した。また、Type II 試験片は Type I 試験片よりも低寿命で破断した。したがって、Type II 試験片では Type I 試験片における疲労過程初期の現象を観察できるものと考えられ、転動疲労過程のその場観察により、転動面に対して斜めのき裂と平行なき裂の発生過程について調べる予定である。

### 3.2 Type II 試験片によるき裂発生過程の観察

き裂発生過程の観察を行った転動疲労試験におけるヘルツ応力  $p_{\max}$  は  $3.89\text{GPa}$  とした。  $1.0 \times 10^5$  または  $3.0 \times 10^5 \text{cycles}$  の繰返し負荷を与える度に転動疲労試験を中断し、CT 観察を行った。  $2.10 \times 10^6 \text{cycles}$  まで疲労試験を行い、計 12 回の CT 観察を行った。観察結果の例を図 7 に示す。図 7

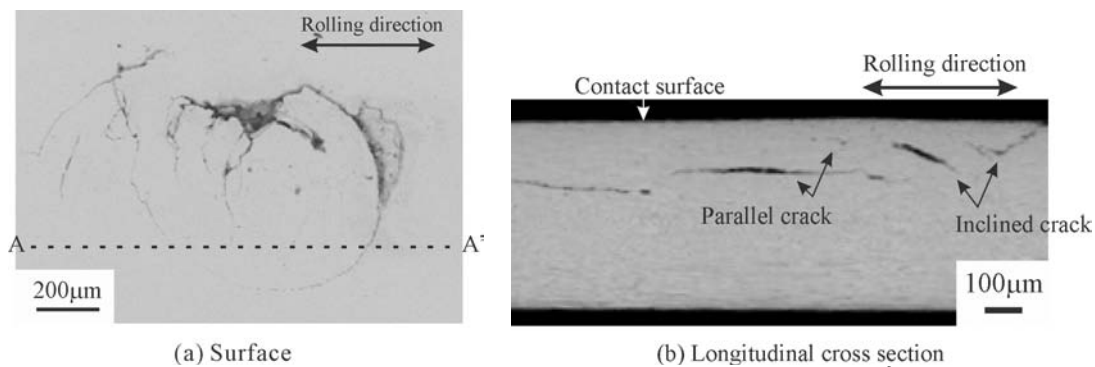


図 4. Type I 試験片の SEM 観察結果 ( $p_{\max} = 3.89\text{GPa}$ ,  $N_f = 5.30 \times 10^6 \text{cycles}$ )

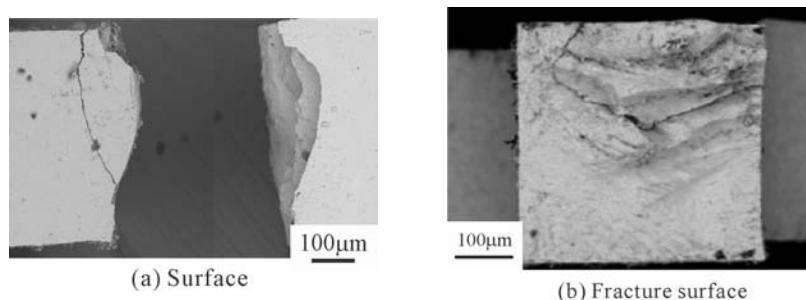


図 5. Type II 試験片の SEM 破面観察結果 ( $p_{\max} = 3.89\text{GPa}$ ,  $N_f = 1.56 \times 10^6 \text{cycles}$ )

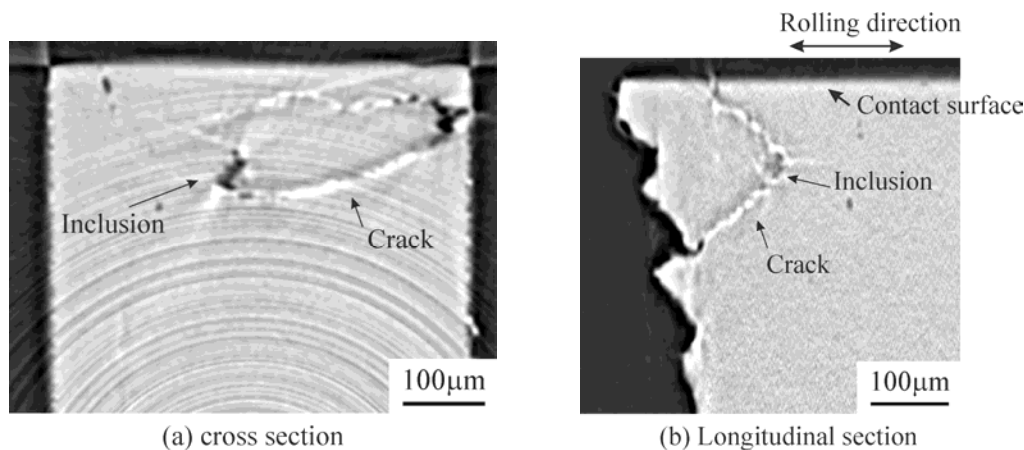


図 6. CT 観察結果(TypeII specimen,  $p_{\max}=3.9\text{GPa}$ ,  $N_f=1.56\times 10^6$  cycles)

に示したように、試験の結果、介在物およびその周囲の時間的な変化を観察することは可能であったが、介在物周囲にき裂らしき像の変化は確認できなかった。また  $1.31\times 10^6$  cycles で破断した試験片についても破断まで2回のCT観察を行うことができたが、破断箇所はCT観察の領域外で生じており、き裂発生過程を観察することができなかった。

転動疲労試験で破損後の試験片についてCT観察を行った結果から、内部でせん断型き裂ではなく転動面に角度を有した斜めき裂が発生していることが明らかとなった。CT観察を効率的に行うために、電位差法などの非破壊検査を適用する予定である。電位差法はき裂の発生による電気抵抗の変化を検出する非破壊検査であり、転動面に対して平行なき裂の検出はできないが、電流の流れを阻害するような転動面に対して角度を有するき裂の検出には有効である。このため、非破壊検査によりき裂発生を検出した上でCT観察を行うことを検討する。

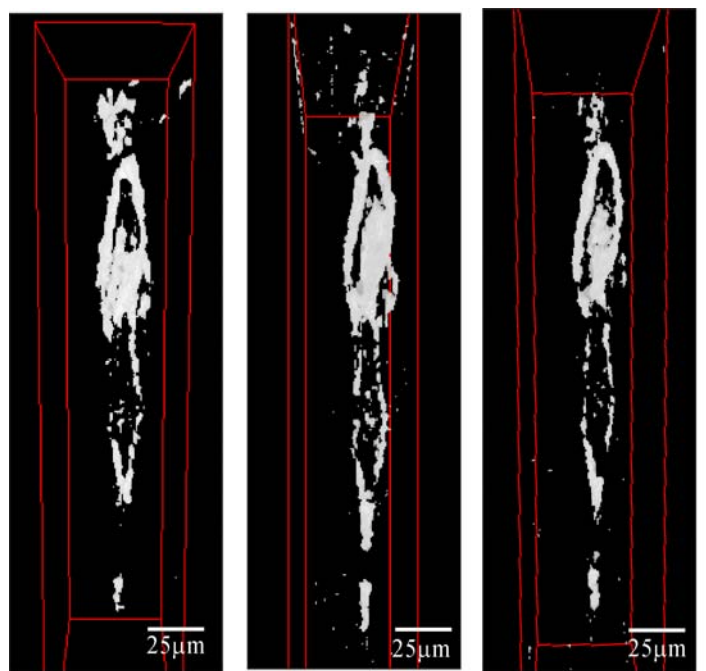


図 7. 転動疲労試験過程のCT観察結果

#### まとめと今後の予定：

CT観察が可能な試験片と転動疲労試験機を用いて、介在物からのき裂発生過程のその場観察を試みた。CT観察用の試験片の破損後のCT観察結果から、この試験片では転動面に対して平行なせん断型き裂ではなく、角度を有する斜めき裂が発生・進展していることが分かった。同一の試験片に対してCT撮影と転動疲労を繰り返すことにより、転動疲労過程を観察した結果、介在物分布の時間的な変化を得ることに成功したが、介在物から発生するき裂は検出されなかった。この場合の試験片は事前の疲労試験から予想された破断繰返し数よりも寿命が長いため、き裂が発生する深さに介在物が存在しなかった可能性がある。そこで電位差法による初期のき裂の発生を検出とCT観察を組み合わせ、効率的に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，2010A 期重点産業利用課題成果報告書，2010A1859(2010).
- [2] 牧野泰三，他，2010B 期重点産業利用課題成果報告書，2010B1859(2010).
- [3] 牧野泰三，他，2011A 期重点産業利用課題成果報告書，2011A1787(2011).
- [4] 牧野泰三，他，2011B 期重点産業利用課題実施報告書，2011B1955(2012).
- [5] 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，2012A1596(2012).