

AE センシングを活用した転がり疲れ試験の表面状態のモニタリング

Monitoring of Surface Conditions in Rolling Contact Fatigue Tests Using AE Sensing

日鉄テクノロジー（正）*向井 悠 埼玉工大（正）長谷 亜蘭

Yu Mukai*, Alan Hase**

*Nippon Steel Technology, **Saitama Institute of Technology

1. 緒言

転がり疲れ環境で使用される鉄鋼材料では、接触・しゅう動する表面もしくは内部からき裂が発生してピッチングやフレーキングに代表されるはく離に至ることが知られている¹⁾。鉄鋼材料の転がり疲れにおいては、き裂の発生・進展・はく離といった劣化状態を把握することがとても重要である。しかしながら、一般的な疲労き裂進展試験のように直接き裂を観察することが難しいため、通常は途中止めによる断面観察などで評価を行っている。

一方、金属材料の表面の損傷形態を *in situ*（その場）で計測できる技術としてアコースティックエミッション（以下、AE）法がある²⁾。AE 法は、き裂の発生のようなエネルギーの解放過程によって発生源から固体内部を伝播する MHz オーダーの弾性応力波（AE 波）を *in situ* で検出する技術であり、転がり疲れ試験と組み合わせることで従来の評価法では得られないような転がり疲労き裂の生成・進展に関する情報の取得が期待できる。

そこで本研究では、鋼材の 2 円筒転がり疲れ試験を実施して AE 信号の取得を行った。表面状態の観察は、規定回数ごとに試験を停止して観察を行うことが多いが、本研究では AE 信号の変化と表面状態の対応関係を解析するため、高速度カメラを用いて試験片の表面状態の変化を *in situ* 撮影し、AE 信号と表面状態の評価を行った。

2. 試験方法および条件

本試験で用いた試験機の外観を Fig. 1 に示す。転がり疲れ試験は西原式摩耗試験機を使用した。本試験機は、円筒形状の試験片を接触させながら歯数の異なる歯車を用いて回転させることで、負荷とすべりを同時に与えることができる。潤滑油は、ナフテン系原料油の ENEOS 製クリセフオイル F8 を採用し、低速側試験片の上から毎分 6 cc 滴下した。試験終了は試験機に取り付けた加速度センサが 2.5G を超えた時とした。

試験中の表面状態の観察のため、高速度カメラ（フォトロン製：Nova S12）を用いて、低速側試験片の表面を撮影した。撮影部分は低速側試験片のしゅう動面の一部で、高速側試験片と接触後に潤滑を受けるまでの間の領域とし、撮影条件は撮影速度 5,000 fps とした。

供試材には機械構造用炭素鋼 S45C を採用した。試験片は粗加工後に 860℃ 水焼入れおよび 580℃ 焼戻しを各 1 時間実施し、外径 $\phi 30$ mm、内径 $\phi 16$ mm、幅 5 mm となるよう仕上げ加工を行った。試験片の幅方向の表面粗さは $Ra = 0.15 \mu\text{m}$ 、 $Rz = 1.16 \mu\text{m}$ とした。なお、試験片硬さは 23HRC 程度である。

AE センサは広帯域型センサ（NF 回路設計ブロック製：AE-900S-WB）を用い、高速側試験片の回転軸があるギアボックスの側面に設置した。AE 増幅率は 50dB とし、ノイズ除去のために 20 kHz のハイパスフィルタ処理を行った。Table 1 に試験条件と AE 計測条件を示す。取得した AE 信号は、ディスクリミネータ（NF 回路設計ブロック製：AE9922）と AE アナライザ（NF 回路設計ブロック製：AE9702）を介して AE 包絡線検波波形と AE 信号生波形をそれぞれ PC に記録した。

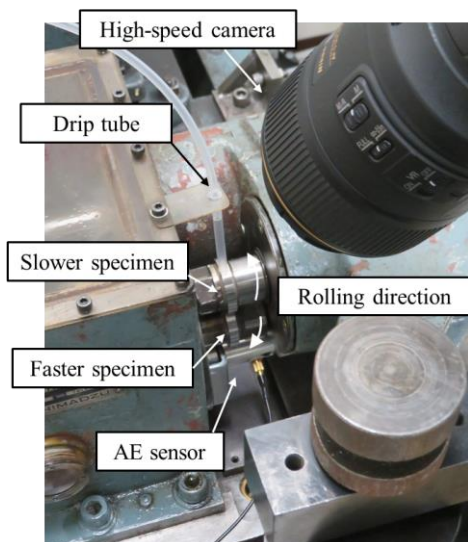


Fig. 1 Appearance of the test section

Table 1 Summary of the experimental condition

Hertzian stress	900 MPa
Specific sliding	9%
Rotational speed	800 rpm (Faster specimen)
AE amplification factor	50dB
AE signal filter	HPF: 20 kHz LPF: through
Sampling rate	0.5 μs

3. 結果および考察

試験は $N=4.5 \times 10^5$ 回で振動増加により停止した。振動増加の原因となったはく離は低速側試験片に発生し、高速側試験片の表面にはき裂と思われる損傷は見られたが、はく離は発生しなかった。このことから、低速側の試験片接触面に生じる引張と圧縮の応力場によって潤滑油が侵入することでき裂の成長が促進され、はく離に至ったと考えられる。

Figure 2 は、試験中に高速度カメラで観察した試験片表面の画像である。 $N=4.1 \times 10^5$ 回においてしゅう動部の表面に 2 mm 程度の表面き裂が初めて観察された。この表面き裂は、繰返し数の増加に伴い Fig. 2 (b) および Fig. 2 (c) のように損傷が進展し、最終的には試験片幅方向全体に及ぶほどのはく離が発生して振動増加により試験は停止した。

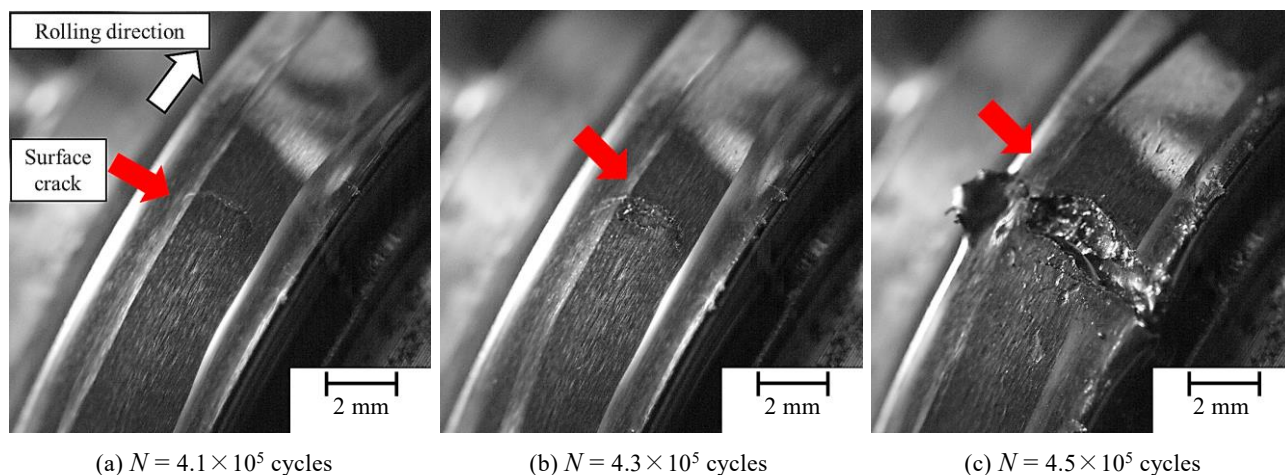


Fig. 2 High-speed camera observations on the specimen surface

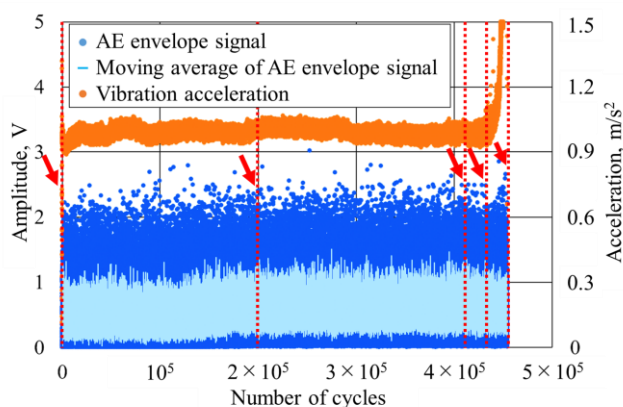


Fig. 3 Changes in AE signal and acceleration

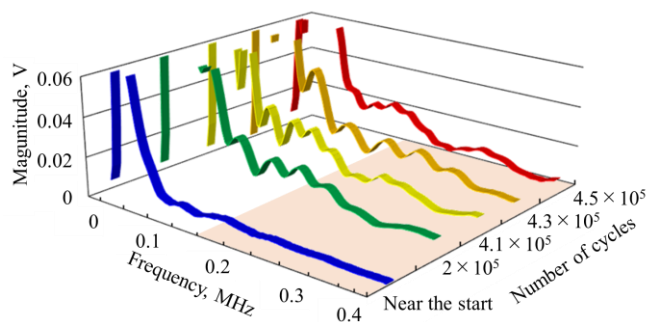


Fig. 4 Changes in the frequency spectrum of AE signal waveform

Figure 3 は、試験中に取得した AE 包絡線検波波形および加速度振幅の結果である。試験中の AE 信号は $N=2 \times 10^5$ 回付近から振幅値が上昇し、突発的な反応も確認されることがわかった。Figure 4 は、Fig. 3 中の赤矢印で示す試験開始直後、試験中盤となる $N=2 \times 10^5$ 回および表面き裂が観察された Fig. 2 中の各ポイントにおける AE 信号生波形の周波数スペクトルの変化である。試験中盤よりき裂や塑性流動起因の 0.2~0.4 MHz 帯の周波数の AE 信号³⁾が確認された。この結果は Fig. 2 に示した表面状態の変化を反映しており、加速度センサよりも早く反応していることから、表面損傷状態の評価のために、AE 周波数スペクトルの変化を分析することは有効であると言える。

4. 結言

西原式摩耗試験機を用いた転がり疲れ試験において AE 信号計測を実施し、AE 信号の変化と高速度カメラによる試験片表面画像の比較を行った。その結果、振動が増加する前から AE センサでは周波数帯の変化といった表面状態に由来する信号の変化を取得することができた。

文献

- 1) 吉田：トライボ設計のための転がり疲れ寿命と面圧強さ，日本理工出版会（2012）31.
- 2) 長谷：アコースティックエミッション計測の基礎，精密工学会誌，78，10（2012）856.
- 3) A. Hase: Early Detection and Identification of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearings by an Acoustic Emission Technique, Lubricants, 8, 3 (2020) 37.