

AE センシングを活用した転がり疲れ試験中の表面き裂発生・進展過程の詳細解析

Detailed Analysis of Surface Crack Initiation and Propagation in Rolling Contact Fatigue Tests by 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・摺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はとても重要であるが、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く、通常は途中止めによる断面観察など破壊的手法で評価を行うことが多い。そのため、試験片に発生したき裂のはく離に至るまでの挙動を、試験中に継続的かつ非破壊的に取得することが難しいといった課題がある。

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、アコースティックエミッション（AE）センシング²⁾を用いて、表面き裂の発生および進展過程について *in situ* 計測を実施した。特に高速度カメラによって撮影したき裂発生・進展といった表面状態の変化と、その近辺で観測された周期的な AE 信号との対応関係に着目し、AE 信号の特徴とき裂の状態との関連について比較・考察を行った。

2. 試験方法および条件

本研究で用いた2円筒転がり疲れ試験機および計測システムの概略を Fig. 1 に示す。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。本実験では、駆動側の回転速度を 800 rpm、試験片間の接触面圧を 1680 MPa とし、すべり率を 9% とした。供試材には機械構造用炭素鋼（S45C）を採用し、試験片の幅方向の表面粗さは $Ra=0.15\ \mu\text{m}$ 、 $Rz=1.16\ \mu\text{m}$ 、試験片硬さは 23HRC 程度とした。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、被駆動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。また、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、すべりを受ける被駆動側試験片の表面を上部から撮影した。

先行研究³⁾での実験・計測システムに加えて、本研究では回転式 AE センサ（東京精密社製：SB-3209）を被駆動側試験片の回転軸に設置した⁴⁾。試験片接触部より発生した AE 波は、回転軸を伝播して回転式 AE センサで受波し、ワイヤレス信号伝送によって受信部で AE 信号として計測される。AE センサからの出力信号は増幅およびフィルタ処理を行い、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。Table 1 に試験条件と AE 計測条件を示す。

Table 1 Summary of the experimental condition

Hertzian stress	1680 MPa
Specific sliding	9%
Rotational speed	800 rpm (Driving-side specimen)
AE amplification factor	20dB
AE signal filter	HPF, LPF: through
Sampling rate	0.5 μs

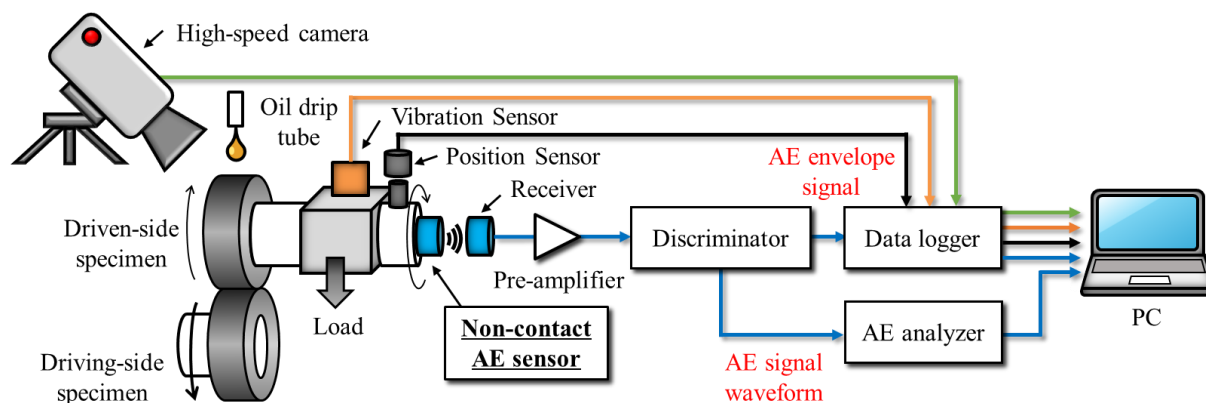


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for rolling contact fatigue test

3. 結果および考察

試験は振動増加により $N=4.5 \times 10^5$ 回で停止した³⁾。振動増加の原因となったはく離は被駆動側試験片に発生し、表面のはく離に至る前の $N=4.1 \times 10^5$ 回の時点で、摺動部の表面に 2 mm 程度の表面き裂が観察された。

Figure 2 は、各き裂発生・進展状態において位置センサを基準とした通過時間による、はく離に至ったき裂に対応する特徴的な AE 包絡線検波波形と、試験中に高速度カメラで観察された試験片表面の画像の比較を示す結果である。Fig. 2 (a) 中の (I) は最終的にはく離に至る位置に発生したき裂であり、位置センサ通過から 0.054 秒付近に AE 包絡線検波波形のピークが見られる。これは駆動側試験片との接触の際にき裂が進展して発生した信号と考えられる。また、0.047 秒付近にも 1 V 程度のピークが観察されており、高速度カメラの観察結果から、微小な表面き裂 (II) が観察され、AE 信号が表面き裂に対しての高い検出感度を有することがわかる。

Figure 2 (b) では、繰返し数の増加により (I) のき裂が進展し、(III) の損傷状態まで進むことで同時間帯のピーク振幅値が上昇していることがわかる。さらに Fig. 2 (a) と同様に別箇所でも進展している微小な表面き裂 (IV) についても振幅値の増加が見られた。試験は最終的に Fig. 2 (c) に示すはく離 (V) の発生により終了したが、はく離 (V) に至る表面き裂 (I), (III) に対応する時間帯において AE 振幅値のピーク値の増加が確認された。

Figure 3 は、試験開始時、寿命中期 ($N=2 \times 10^5$ 回) および Fig. 2 (a) から (c) に対応する時間帯の AE 信号生波形の周波数解析を実施した結果である。損傷の進展に伴い、周波数スペクトルのピーク値にも接触に伴う摩擦や疲労損傷の進行に伴う変化⁵⁾が見られていることから、高速度カメラにおいて目視確認が困難な初期の微小表面き裂においても、AE 信号は表面状態の変化をより詳細に捉えることが可能であると言える。

4. 結言

2 円筒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、AE 信号の振幅や周波数帯の変化が、表面き裂評価の指標として有効であることが確認された。

謝辞

本研究の一部は第 44 回 (2024 年度) ENEOS 東燃ゼネラル研究奨励・奨学会 研究助成による補助のもとで行われたことを付記し、ここに謝意を表する。

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) 向井・長谷：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，トライボロジー会議予稿集 2025 春 東京，(2025) 289
- 4) 長谷・向井：回転軸 AE センシングによる転がり疲労損傷の in situ 計測・診断，Dynamics and Design Conference 2025 (D&D2025) 講演予稿集，(2025) OS6-1-3-01.
- 5) A. Hase: Early Detection and Identification of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearings by an Acoustic Emission Technique, Lubricants, 8, 3 (2020) 37.

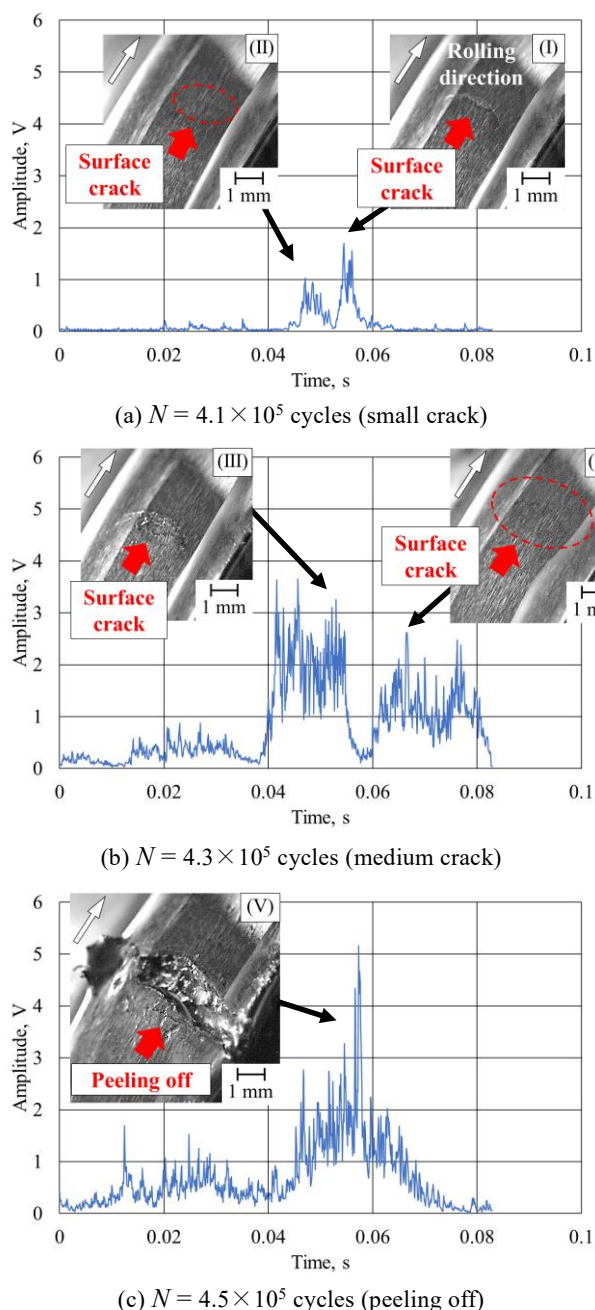


Fig. 2 Changes in the AE envelope signals corresponding to crack propagation observed by high speed camera

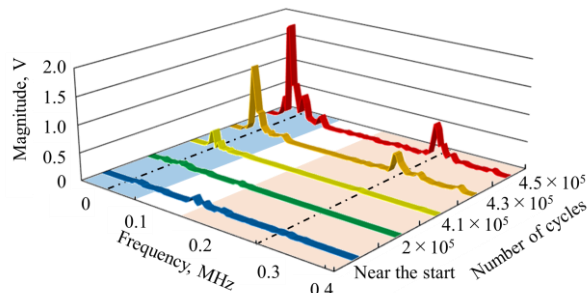


Fig. 3 Changes in the frequency spectrum of AE signal waveform