

転がり疲れ試験において疲労寿命に与える要因と アコースティックエミッション信号の関係

Relationship between Factors Affecting Fatigue Life and Acoustic Emission Signals
in Rolling Contact Fatigue Tests

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キ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、接触面圧や接触面のすべりは、き裂発生・進展・はく離といった大きな影響を与え、これらの特性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いため、現状で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* 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れき裂に関する特性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。試験面圧の違いやすべりによる摩擦モードの違いが AE 信号に与える影響について、表面状態の変化と比較することによって評価を行った。

2. 試験方法および条件

本試験で用いた試験機の外観および計測システムを Fig. 1 および Fig. 2 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。本実験では、歯車を外して被駆動軸側の試験片を駆動軸側の試験片に接触させることによって回転させる摩擦モードの試験（以下、ランダムすべりと呼ぶ）と、歯数が 9%異なる歯車を使用して実施する摩擦モードの試験（以下、強制すべりと呼ぶ）の二つの試験を実施した。試験面圧は 900 MPa および 1680 MPa とし、ランダムすべり試験は 1680 MPa のみ実施した。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。また、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、10⁵ 回とそれ以降は 10⁶ 回ごとに試験機を停止して、試験片を取り外して表面状態を観察した。

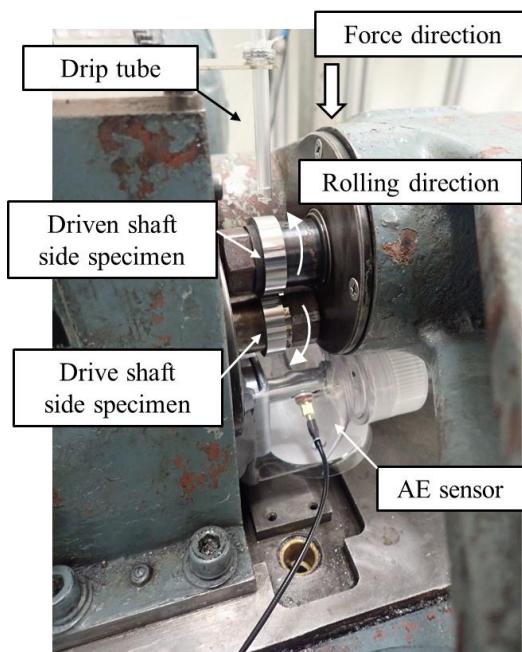


Fig. 1 Appearance of the test section

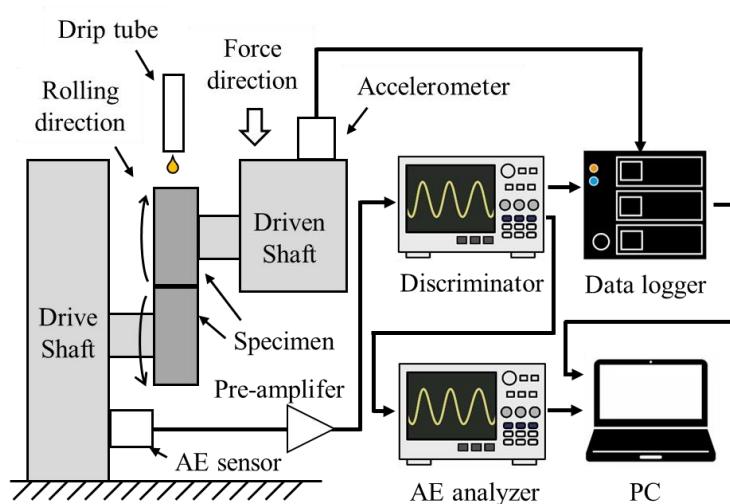


Fig. 2 Schematic drawing of the AE measuring system

供試材には機械構造用炭素鋼 S45C を採用した。試験材の化学組成を Table 1 に示す。試験片は粗加工後に 860°C 水焼入れおよび 580°C 焼戻しを各 1 時間実施し、Fig. 3 の形状となるよう仕上げ加工を行った。板厚 8 mm の試験片は 900 MPa 試験に、板厚 5 mm の試験片は 1680 MPa 試験に使用した。試験片硬さは 23HRC 程度であり、試験片の幅方向の表面粗さは $R_a = 0.17 \mu\text{m}$, $Rz = 1.39 \mu\text{m}$ とした。

AE センサは広帯域型センサ (NF 回路ブロック製: AE-900S-WB) を用い、駆動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 2 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 回路ブロック製: AE9922) と AE アナライザ (NF 回路ブロック製: 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。

3. 結果および考察

3.1 破損繰り返し数と試験片表面状態について

各試験ともに、試験片表面にはく離が発生することによる振動の増加により終了した。各試験条件における破損繰り返し数および破損した試験片について Table 3 に示す。面圧の影響により 1680 MPa での転動疲労寿命は 900 MPa に比べて半分となった。また、ランダムすべり試験は、駆動側、被駆動側の試験片ともにはく離が見られた一方で、強制すべり試験は、面圧に関わらず低速となる被駆動側の表面にのみはく離が発生した。高速回転する駆動側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。

途中止めによる表面観察の結果、すべての試験条件において試験片表面に塑性流動とき裂が観察された。その代表的な SEM 画像を Fig. 4 に示す。本試験条件では、Fig. 4(a) のような繰り返し接触による塑性流動が発生し、摩擦面と垂直にしづが形成されていることが確認できる。これらのしづがき裂の発生源となり、潤滑油がき裂に出入りすることでき裂の成長が促進され、移着領域が拡大することにより最終的にはく離が発生したと考えられる。これは、強制すべり・900 MPa 試験においては $N = 2 \times 10^6$ 回終了後の被駆動側試験片に観察された Fig. 4(b) のはく離からも明らかであり、破面は繰り返し負荷により

Table 1 Chemical composition of the specimen (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.46	0.21	0.69	0.17	0.13	0.08	0.04	0.15

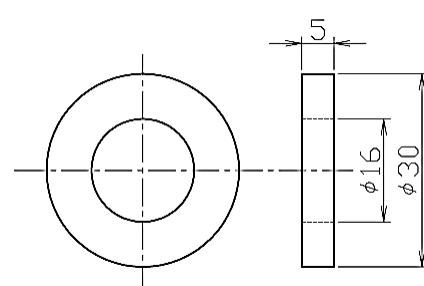
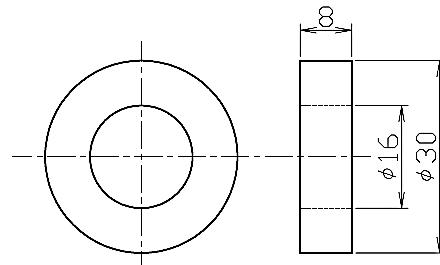
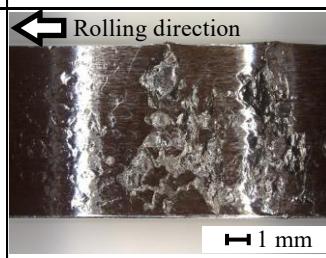
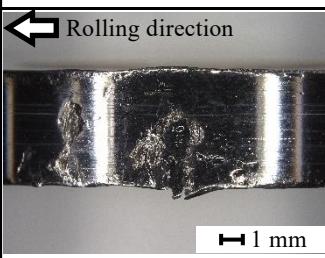
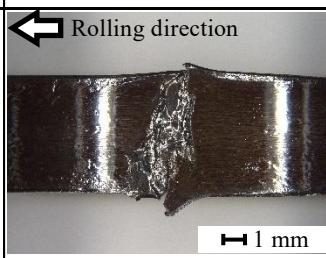


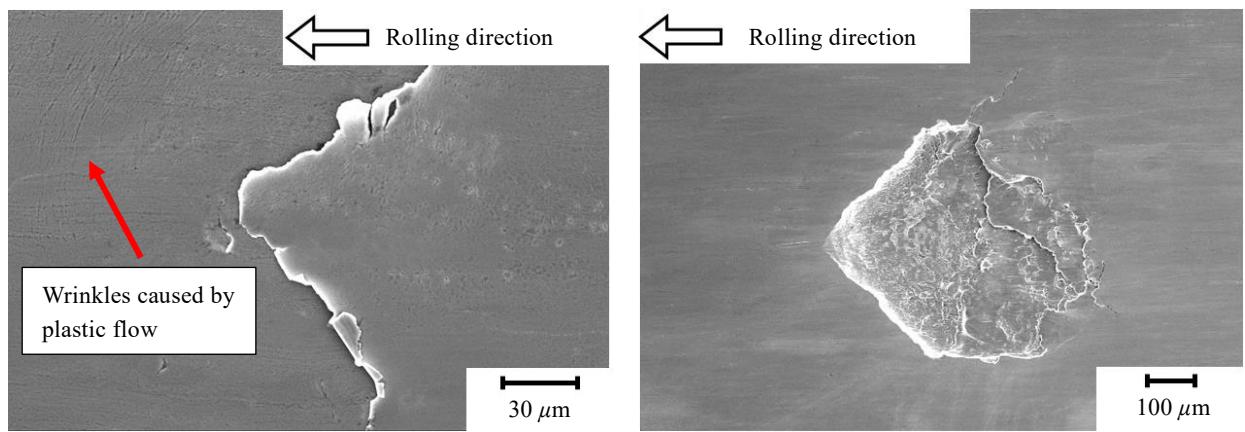
Fig. 3 Geometry of the specimen

Table 2 Summary of the experimental condition

Hertzian stress	900 MPa	1680 MPa
Friction mode	Forced slip	Random slip Forced slip
Rotational speed	800 rpm (Drive shaft side specimen)	
AE amplification factor	50dB	
AE signal filter	HPF:20 kHz LPF:through	
Sampling rate	0.25 μs	0.5 μs

Table 3 Number of cycles to failure and failed specimens for each test condition

Hertzian stress	900 MPa	1680 MPa	
Friction mode	Forced slip	Random slip	Forced slip
Rolling contact fatigue life	3.5×10^6	3.5×10^5	1.1×10^6
Failed specimen	Driven side	Both sides	Driven side
Micrographs of the driven side specimen surface after the experiment	 Rolling direction	 Rolling direction	 Rolling direction



(a) Plastic flow during forced slip test at 1680 MPa

(b) Pitting during forced slip test at 900 MPa

Fig. 4 SEM observations on the specimen surface

押しつぶされており、明確なストライエーションは見られないものの、扇形の剥離の先端から回転方向に放射状の模様が残っていることから、表面起点による剥離が発生したと推測される。試験片の表面観察ではこのような現象が確認されているが、加速度センサでは試験片が激しく損傷するまで表面状態の変化を捉えることができなかった。

3.2 はく離確認直前の AE 信号源波形と加速度センサの比較

Figure 4(b)のはく離を確認した $N = 2 \times 10^6$ 回停止直前の AE 信号源波形と加速度センサの比較を Fig. 5 に示す。連続型 AE 信号の中に突発型の AE 信号が観察されており、この突発型 AE 信号は試験初期より試験終了直前まで観察された。また、この突発型の信号は加速度センサでは反応していないことがわかる。この突発型 AE 信号と試験初期の AE 信号の周波数解析の結果を Fig. 6 に示す。試験初期の連続型 AE 信号に比べて突発型 AE 信号は 0.1 MHz 未満の周波数で大きなピークが見られた。また、0.1~0.3 MHz 以上の周波数も観察されることから、接触による塑性流動と微細な欠陥の生成に起因³⁾する弾性波であることが示唆された。

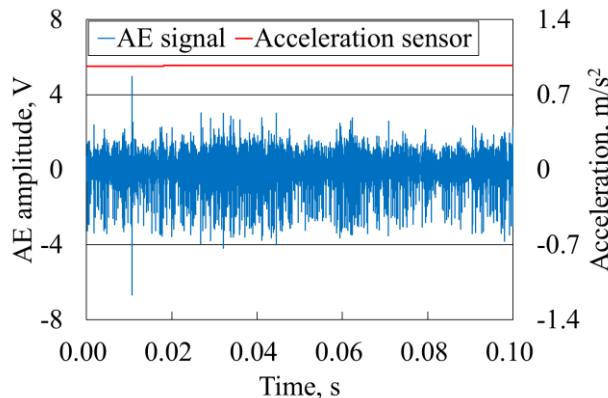


Fig. 5 Comparison of AE signal and acceleration sensor

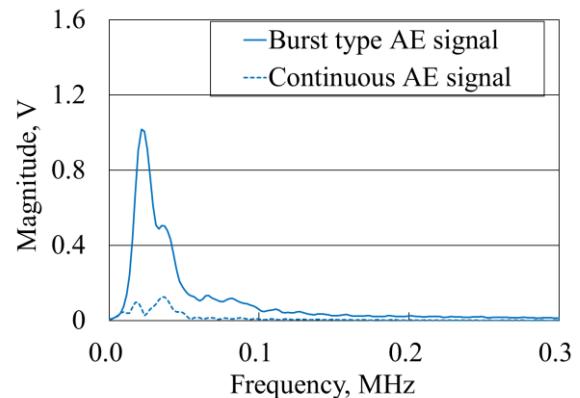
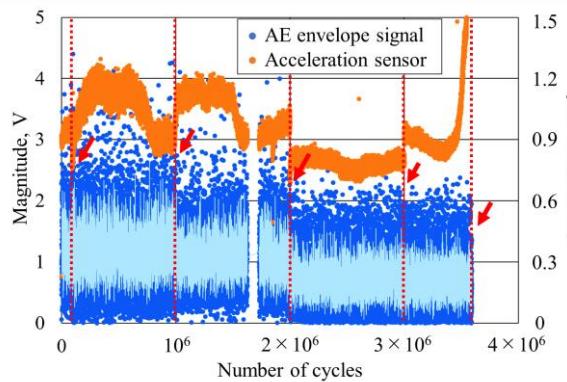


Fig. 6 Comparison of AE signals frequency spectrum

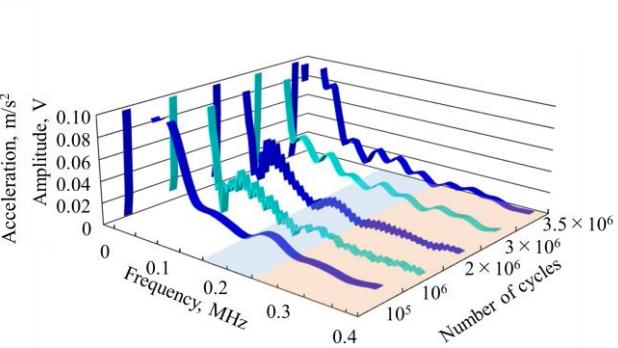
3.3 摩擦モードおよび面圧の影響による AE 信号と変化

Figure 7 は、各試験の試験開始から終了まで取得した AE 包絡線検波波形および加速度センサの結果である。Fig. 7(a)の低面圧の試験では突発型 AE 信号が多く見られるため、Fig. 7(b), (c)の高面圧の試験に比べて振幅が大きくなる傾向があるが、試験後半にかけて AE 信号の振幅が減少する。一方、高面圧の試験では、突発型 AE 信号が見られるものの、初期のなじみが高面圧により一気に進行するため、振幅が試験中盤から後半にかけて増加することが確認された。これらの反応は表面状態の変化に対応すると考えられ、加速度センサの反応はどの条件においてもほぼ同様の結果が得られていることから、AE センサは加速度センサと比べて試験片表面状態の変化を顕著に捉えている。

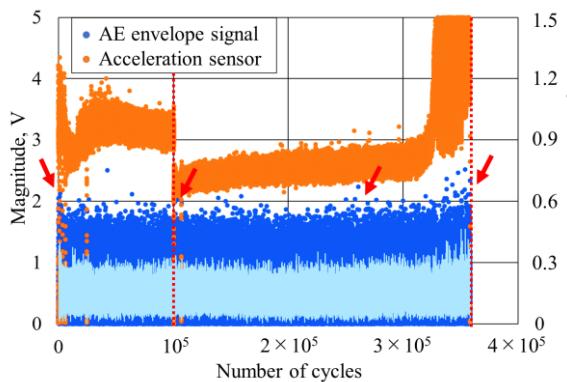
Figure 8 は、試験中の各試験回数における AE 信号原波形の周波数解析の結果である。周波数解析は、Fig. 7 中の赤矢印で示す各ポイントで実施した。この結果から初期より塑性流動起因の 0.25~0.4 MHz 帯の周波数が確認され、疲労き裂に起因する 0.2 MHz の周波数帯の信号も確認されることがわかった。このことから、摩擦モードや面圧といった寿命に与える要因の変化に伴って試験片表面で起こるトライボロジー現象を、AE 法を用いて識別することができると考える。



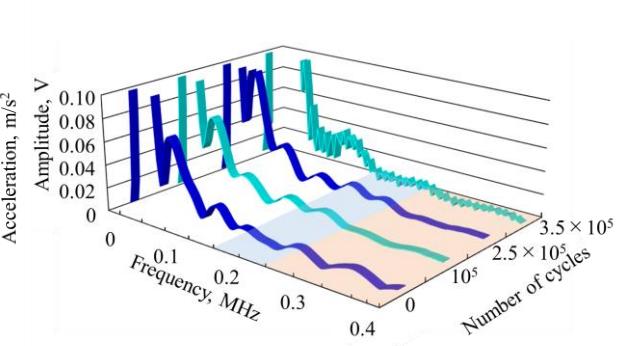
(a) Forced slip test at 900 MPa



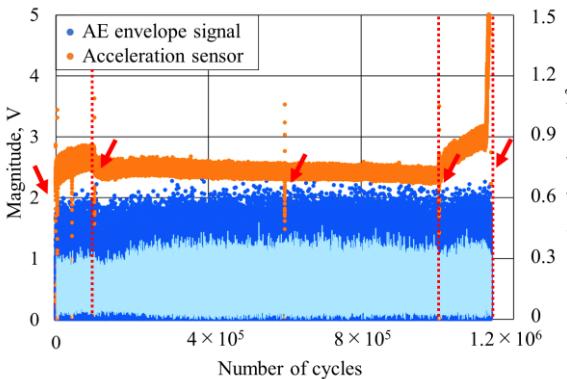
(a) Forced slip test at 900 MPa



(b) Random slip test at 1680 MPa

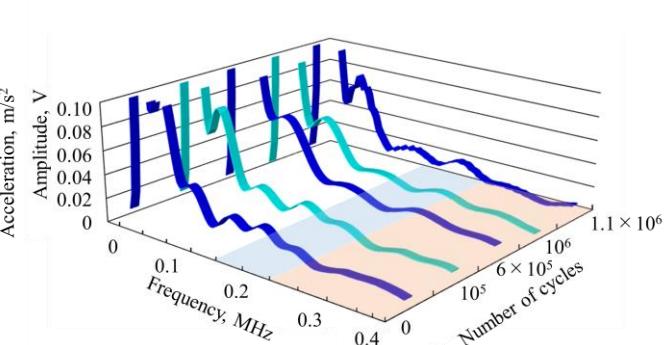


(b) Random slip test at 1680 MPa



(c) Forced slip test at 1680 MPa

Fig. 7 Comparison of the AE signal and acceleration for friction mode and contact pressure



(c) Forced slip test at 1680 MPa

Fig. 8 Changes in the frequency spectrum of AE signal waveforms for friction mode and contact pressure

4. 結言

西原式摩擦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、寿命に与える要因の変化に伴う AE 信号の変化と途中止めによる表面の SEM 観察の比較を行った。その結果、振動が増加する前から AE センサでは突発型 AE 信号の発生や振幅、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.