

AE 法を用いた円すいころ軸受の焼付き予兆検知に関する研究

Detection of Seizure Sign in Tapered Roller Bearings Using AE Technique

ジェイテクト（正）*獅子原 祐樹 埼玉工大（正）長谷 亜蘭

Yuki Shishihara*, Alan Hase**

*JTEKT CORPORATION, **Saitama Institute of Technology

1. はじめに

多くの産業分野において、これまで以上に安全性および信頼性の高い機械システムへの要求が高まっている。転がり軸受をはじめとするトライボロジー部品の損傷は、システム全体の重大な故障に直結することが多く、故障の未然防止が必要とされている。特に、転がり軸受の損傷、摩耗、潤滑状態等を検知する技術が古くから検討されており、振動法、温度法などが古くから広く検討されている¹⁻³⁾。近年では、振動法や温度法よりも高感度であり、現象変化の検出能力に優れた計測手法としてアコースティックエミッション（AE）法が再び注目されている⁴⁾。AE法は、固体の変形や破壊の際に生じる弾性波（AE波）を検出する方法である⁵⁾。AE波は、数kHz～数MHzの高周波数領域の微弱な電気信号として計測される。そのため、従来の計測技術では、外乱となるノイズの影響により、過渡的な現象の検出に留まっていた。しかし、近年の計測機器・解析技術の発展により、再び注目されるようになった。

摩擦面で発生するAE波は表面突起間の相互作用による変形および破壊現象に起因し、他の手法より早期に変化を捉えられるため、摩擦および摩耗現象を高い精度で認識、評価することが可能となる。しかしながら、摩擦過程で計測されるAE信号には表面突起同士の接触、変形、表面突起や介在粒子による掘り起こし、凝着、き裂の発生、進展など多くの現象が含まれる。そのため、状態検知にAE法を適用する場合、摩擦面の現象とAE信号との関係性を把握することが必要不可欠であるが、転がり接触下における摩擦面の現象とAE信号との検討はほとんどなされていない。

本研究では、転がり接触下の摩擦面現象として、円すいころ軸受における潤滑不良に発生する焼付きに着目した。この焼付きが発生する前後において観察される内輪大つば面の表面変化とその時に検出されるAE信号とを明らかにし、摩擦面の現象とAE信号との関係性を検討した。

2. 試験方法

2.1 焼付き評価

本研究で用いた試験装置および試料軸受の寸法諸元をFig. 1およびTable 1にそれぞれ示す。試験は、試料軸受にアクシアル荷重を負荷した状態で内輪を回転させ、後述する条件で潤滑油の供給量を300ml/minから段階的に減少させることにより実施した（Table 2）。時間は各供給油量で10minを基本とし、軸受外輪温度が安定していない場合は安定するまで同じ油量で試験を行った。潤滑には、無添加のターピン油（ISO粘度グレードVG68）を潤滑油として用いた。潤滑油の供給方法に関しては、次の2条件で実施した。Condition 1では、供給油量を300ml/minから1ml/minまで減少させる試験を実施し、試験中に計測トルクが5N·mを越えた時点を焼付きと判断した。後述するように、Condition 1の試験では、1ml/minの供給油量で焼付きの発生を確認した。Condition 2では、焼付き前の軸受表面状態を確認するため、供給油量を10ml/minまで減少した段階で試験を停止し、焼付き前の表面状態を評価した。

2.2 AE計測

AEセンサは、試料軸受で発生するAE波の検出感度を高めるため、筐体の試料軸受近傍に設置した。この設置場所は試験中に温度が上昇するため、高温対応のAEセンサ（型式：AE-900H-200-WP）を用いた。AEセンサにより電圧信号として検出されたAE信号は、プリアンプを用いて40dBで増幅し、100kHzのハイパスフィルタによりノイズを除去したのち、メインアンプを用いて30dBで増幅した。焼付き過程におけるAE周波数の変化を確認するため、AE信号原波形の周波数解析を実施した。さらに、AE周波数スペクト

Table 1 Specification of test bearing

| | |
|-------------------------------|---------|
| Inner diameter, mm | φ34.925 |
| Outer diameter, mm | φ79.000 |
| Bearing width, mm | 31.0 |
| Basic dynamic load rating, kN | 48.0 |

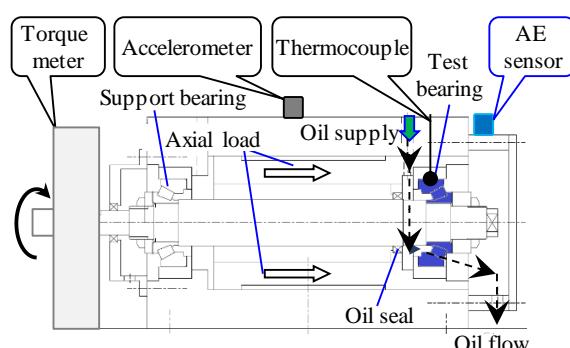


Fig. 1 Test rig for bearing seizure

Table 2 Test condition for bearing seizure

| | |
|-------------------------------------|--|
| Axial load, kN | 26.3 |
| Rotational speed, min ⁻¹ | 2500 |
| Oil amount, ml/min | Condition 1: 300→250→200→150→ 100→50→25→10→1 Condition 2: 300→250→200→150→ 100→50→25→10 |
| Lubricant | VG68 (Non additive) |

ルの特徴把握のため、重心周波数 f_g を算出した。ここで重心周波数 f_g は、周波数スペクトルの加重平均を表す指標であり、各周波数 f_i における信号強度 $A(f_i)$ の積和を信号強度の総和で除したもので定義され、以下の式(1)で示される。

$$f_g = \frac{\sum_i A(f_i) * f_i}{\sum_i A(f_i)} \quad (1)$$

3. 試験結果

3.1 焼付きに至るまでの計測信号の時間変化

焼付きに至るまでの AE 信号振幅、トルク、振動および軸受外輪温度の時間変化を Fig. 2 に示す。供給油量が最も少ない 1 ml/min まで減少させた場合、AE 信号振幅は最大 3.3 V、トルクが最大 5.0 N·m、振動が最大 3.7 m/s² まで増加し、軸受外輪温度は最大 82°C まで上昇した。この時のトルク値から焼付きと判断し、試験を停止させた。なお試験後の内輪大つば面および円すいころ大端面には、試験前に認められなかった接触痕と変色が認められていた。表面観察結果の詳細については 3.2 節で述べる。

試験停止直前の、供給油量 10~1 ml/min における AE 信号振幅、トルク、振動および軸受外輪温度の時間変化を Fig. 3 に示す。AE 信号振幅は、供給油量を 10 ml/min から 1 ml/min に変化させた直後 (95 min 付近) に増加が認められた。一方、トルクおよび振動は、油量変化の約 2 min 後 (97 min 付近) から増加し始め、その約 1 min 後 (98 min 付近) に急激に增加了。また、軸受外輪温度は、油量変化の約 1 min 後 (96 min 付近) から緩やかに上昇し始め、トルクの急激な増加と同じタイミング (98 min 付近) で急上昇した。本測定結果から、AE 信号振幅のみが供給油量を 1 ml/min に変化させたタイミングと同時に顕著な変化を示していることから、AE 法が最も高い感度を示した。

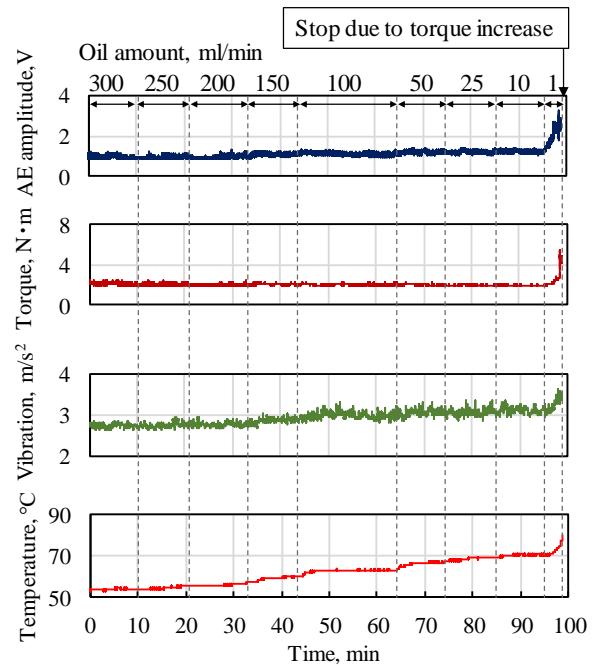


Fig. 2 Changes in measurement signals (AE amplitude, torque, vibration and bearing temperature)⁶⁾

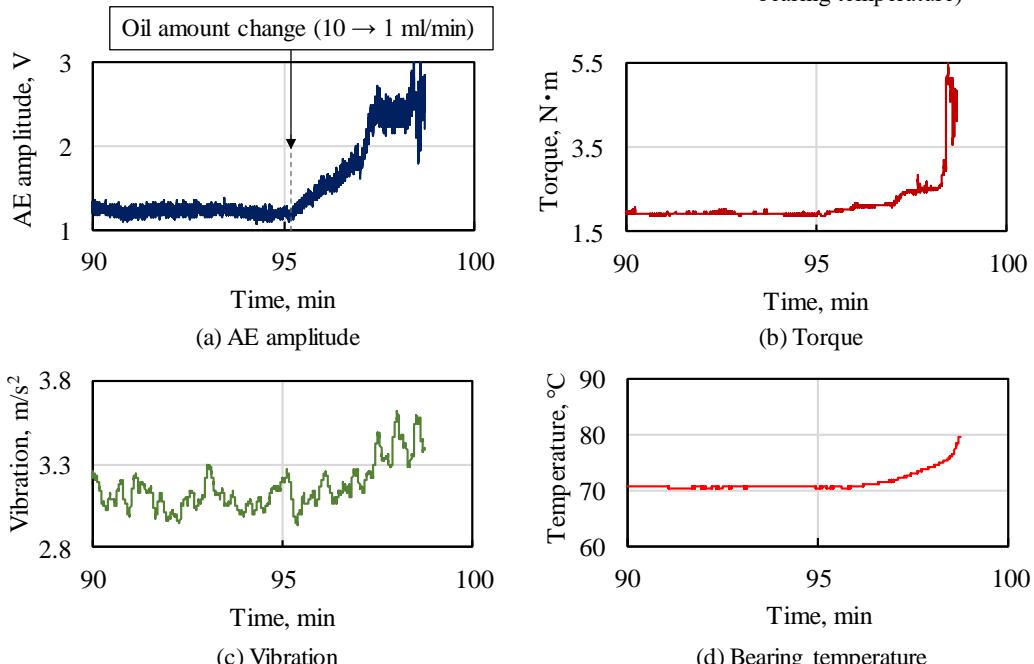


Fig. 3 Changes in measurement signals for the last 10 minutes⁶⁾

3.2 表面状態の比較

内輪大つば面と円すいころ大端面の顕微鏡観察画像を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。焼付き発生前に停止した Condition 2において、試験後の内輪大つば面および円すいころ大端面に接触痕が認められた。しかし、焼付き発生後に停止した Condition 1 と比較して軽微な接触痕を確認した。焼付き前後の表面形状の変化を把握するため、内輪大つば面に関してレーザ顕微鏡による表面観察および表面プロファイルの測定を行った (Fig. 6)。焼付き前の表面は、内輪大つば面にサイクロイド状のしゅう動痕が認められ、試験前の表面と比較して、表面凹凸の増加が認められた。一方、焼付き後の表面は、変色が顕著に認められた箇所において、内輪大つば側は局所的に押し潰され、20 μm の範囲で表面凹凸が平滑化されている状態を確認した。

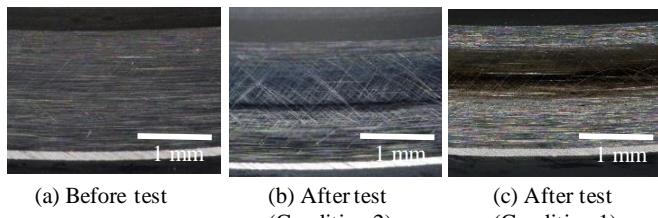


Fig. 4 Microscope observation images of cone back face rib⁶⁾

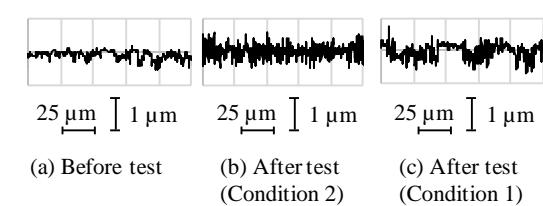
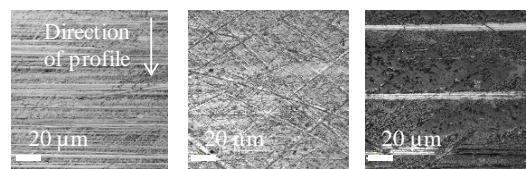


Fig. 6 Laser microscope observation images and profiles of cone back face rib⁶⁾

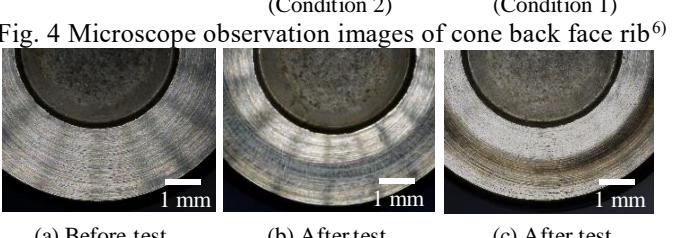


Fig. 5 Microscope observation images of roller large end face⁶⁾

3.3 AE 周波数スペクトル分析結果

各供給油量における AE 周波数スペクトルの代表波形を Fig. 7 に示す。いずれの供給油量においても、主要な周波数ピークは 0.1~0.4 MHz 付近に認められ、供給油量が少ないほどそれらのピーク強度が増加する傾向が認められた。ただし、供給油量が 1 ml/min の場合のみ、1.2 MHz 付近にピークが認められた。この一連の試験における重心周波数の変化を Fig. 8 に示す。横軸は、解析したスペクトルが、試験開始時 (0 min) からの波形数に相当する。重心周波数は、供給油量が 300 ml/min から 10 ml/min までは、0.36~0.40 MHz の範囲で変動している。供給油量が 1 ml/min に減少したタイミングから重心周波数の顕著な増加傾向が認められ、最大で 0.45 MHz となった。これは、供給油量が 1 ml/min に減少したタイミングにおいて主要ピークが高周波数側にシフトしたことを見ている。

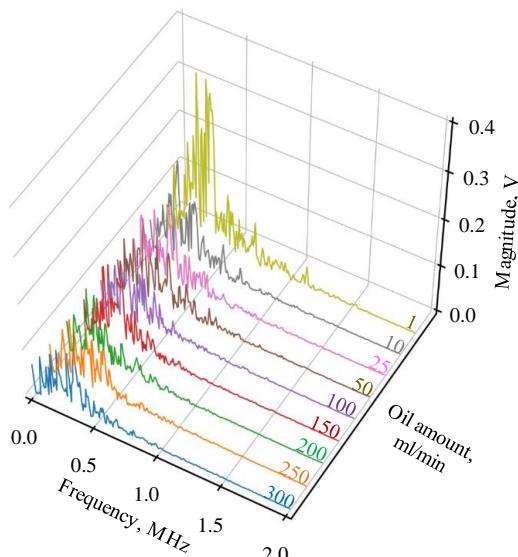


Fig. 7 Frequency spectra of AE signal waveforms⁶⁾

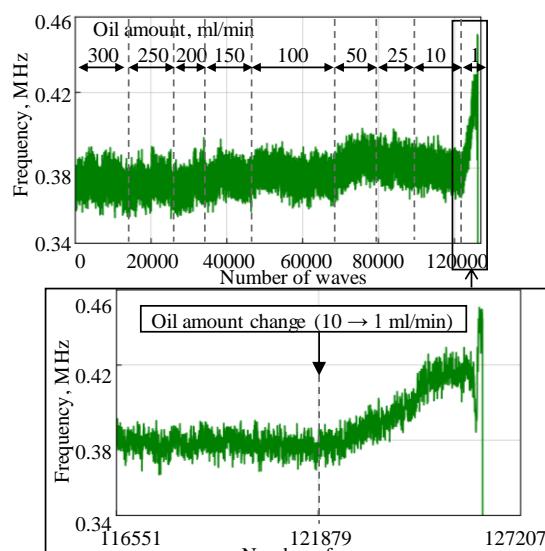


Fig. 8 Frequency center of gravity of AE signal waveforms⁶⁾

4. 考察

4.1 焼付き前の表面変化と AE 周波数の関係

摩擦面変化と AE 信号との関係性を明らかにするため、先ずは焼付き前の表面状態と AE 周波数スペクトルとの対応関係を考察した。焼付き前の表面は、内輪大つば面に顕著なしゅう動痕が認められた。焼付き前の内輪大つば面およびこころ大端面の表面粗さの実測値と、温度上昇を考慮した油膜厚さの計算値から算出した油膜パラメータ Λ は、金属表面の突起間接触が起こり始めるとして $\Lambda < 3$ の範囲であった。そのため、焼付き前までの表面では、金属表面の突起間接触が発生していたと考える。このときの AE 周波数変化を明確にするため、供給油量 300 ml/min における AE 周波数スペクトルと焼付き前の供給油量 10 ml/min における AE 周波数スペクトルを比較した (Fig. 9)。どちらの供給油量においても、0.1~0.4 MHz 付近で高い AE 信号強度が得られたが、供給油量が多い 300 ml/min よりも供給油量が少ない 10 ml/min の信号強度が高くなかった。一般に、トライボロジー現象において、0.05~0.5 MHz 付近の低周波数域で発生する AE 信号は、金属表面の突起間接触およびそれに伴う塑性変形に起因することが過去に報告されている^{7,8)}。本試験においても、同様に 0.1~0.4 MHz が主要な周波数ピークであることから、金属表面の突起間接触とその塑性変形が発生したと考える。

4.2 焼付き前後の表面変化と AE 周波数の関係

焼付きによる内輪大つば面およびころ大端面における表面変化の更なる詳細検討のため、焼付き前後の内輪大つば面ところ大端面の SEM (Scanning electron microscopy, 走査電子顕微鏡) 観察を行った (Fig. 10)。内輪大つば面およびころ大端面のどちらの表面においても、焼付き前の表面には、摩耗の痕跡が認められ、焼付き後の表面には、押し潰された箇所が広く重なっている様子が確認できた。焼付き後の表面状態は、内輪大つば面およびころ大端面の接触部において摩耗粒子が生成し、それぞれの面への移着や接触部で繰り返し押し潰されることを繰り返した結果、固着したものと推定する。試験停止時のトルク増加は、摩擦面間における移着粒子の固着によるものであり、焼付き後に認められた局所的に押し潰された表面は、移着粒子に起因し、凝着による表面変化であると推定した。内輪大つば-ころ大端面間において、移着粒子による凝着が発生した際の AE 周波数変化を明確にするため、焼付き前の供給油量 10 ml/min (94.5 min) における AE 周波数スペクトルと、供給油量 1 ml/min (96.8 min) における AE 周波数スペクトルを比較した結果、供給油量 1 ml/min でのみ 1.2 MHz 付近に周波数ピークが認められた (Fig. 11)。この 1~1.5 MHz 付近の周波数域で発生する AE 信号は、凝着摩耗に起因することが過去のすべり摩擦下での検討から知られている⁷⁾。本試験における転がり-すべり摩擦下においても、表面観察結果より凝着により焼付きが発生した時のピーク出現と一致した。

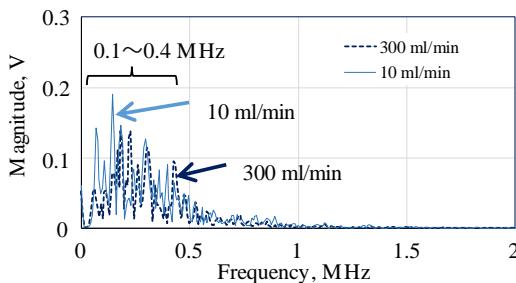
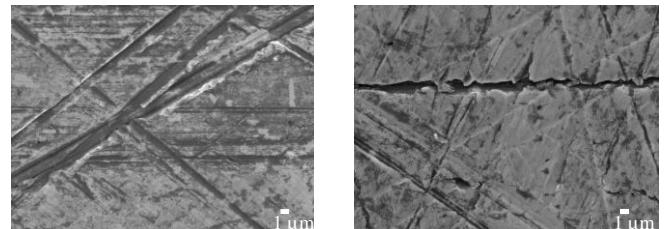


Fig. 9 Frequency spectrum of AE signal waveform at 300 ml/min and 10 ml/min⁶⁾



(a) Cone back face rib (Before seizure) (b) Roller large end face (Before seizure)

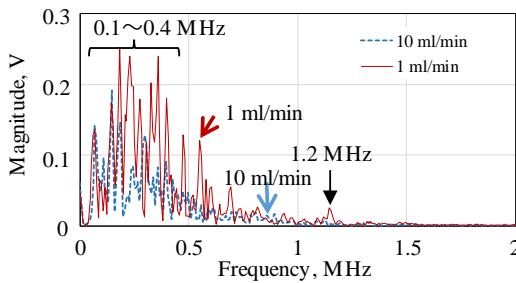
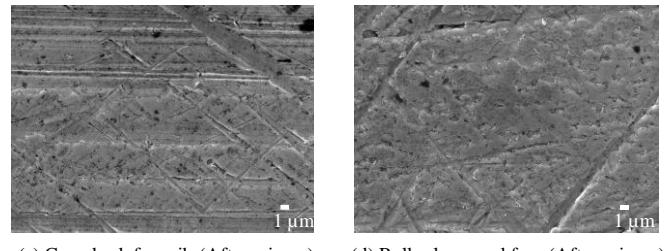


Fig. 11 Frequency spectrum of AE signal waveform at 10 ml/min and 1 ml/min⁶⁾



(c) Cone back face rib (After seizure) (d) Roller large end face (After seizure)

5. まとめ

- 1) 円すいころ軸受が潤滑不良により焼付きに至る前後での内輪大つば面の表面変化と AE 信号との関係から、金属表面の突起間接触の増加が 0.1~0.4 MHz 付近の AE 周波数ピークと対応し、内輪大つば-ころ大端面で生じた凝着の進行が 1.2 MHz 付近の AE 周波数ピークの増加に対応していることを明らかにした。
- 2) 焼付きに至るまでの AE 信号変化を計測した結果、焼付きが発生する供給油量に変化させたタイミングにおいて、従来の検出方法であるトルク、振動、軸受外輪温度よりも早く、AE 信号振幅が高感度で変化を捉えることができるることを確認した。

文献

- 1) 若林・間野：軸受異常診断の現状と動向、トライボロジスト, 59, 6 (2014) 323.
- 2) 辺見：転がり軸受の異常診断、計測と制御, 55, 3 (2016) 221.
- 3) 小門・西・山本・谷口：揚水発電所異常診断システム 軸受温度異常診断、ターボ機械, 27, 2 (1999) 96.
- 4) 長谷：AE 計測による転がり軸受の損傷評価技術、トライボロジスト, 65, 9 (2020) 555.
- 5) 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.
- 6) 獅子原・長谷：AE 法を用いた円すいころ軸受の焼付き予兆検知に関する研究、トライボロジスト, 68, 5 (2023) 掲載予定。
- 7) A. Hase, H. Mishima, M. Wada: Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms, Wear, 292-293 (2012) 144.
- 8) A. Hase: Early Detection and Identification of Fatigue Damage in Thrust Ball Bearings by an Acoustic Emission Technique, Lubricants, Vol.8 (2020) 37.