

ポータブルAE診断器による エスカレータ用軸受診断技術の開発と実設備検証

谷 雅信^{*1}, 山田 哲也^{*2}, 小田 将広^{*3}, 湊上 芳樹^{*3}, 橋本 博司^{*3}

Development of rolling bearing diagnostics for escalators by using the portable AE diagnosis instrument and its field verification

Masanobu TANI^{*1}, Tetsuya YAMADA^{*2},
Masahiro ODA^{*3}, Yoshiki FUCHIGAMI^{*3} and Hiroshi HASHIMOTO^{*3}

^{*1} East Japan Railway Co.

2-2-2 Yoyogi, Shibuya-ku, Tokyo 151-8578, Japan

^{*2} JR EAST MECHATRONICS CO., LTD.

Shinjuku Maynds Tower, 2-1-1, Yoyogi, Shibuya-ku, Tokyo, 151-0053, Japan

^{*3} JFE Advantech Co., Ltd.

3-48 Takahata-cho, Nishinomiya, Hyogo, 663-8202, Japan

Abstract

Low speed rotating bearing diagnosis for core mechanical parts, such as step chain sprockets and handrail driving wheels, of escalators in train stations is critical to maintain daily steady transportation of huge number of passengers. Since usual vibration diagnosis methods cannot be adapted because of its low sensitivity to low speed rotating machinery, we proposed the new diagnostic technique based on Acoustic Emission (AE) technology in order to detect failures of such low speed rotating bearings of the escalators before severe damages occur and to numerically record the results of diagnosis. A number of AE measurements at actual facilities of various train stations were carried out with the portable AE diagnosis instrument MK-560 (JFE Advantech Co., Ltd.). It was revealed that some damaged bearings indicated the high values of an AE parameter named E_area which was developed by some of the authors. There were, however, two major problems to be solved. First, meshing noise from the sprocket was frequently overlapped to the AE signal, which caused high values of E_area even for good bearings. The newly developed noise removal procedures were added to evaluation of E_area to greatly alleviate the situation. Its effectiveness was verified by AE measurements of actual facilities. Secondly, we found that E_area might not indicate high value for severe unlubricated bearings. This was because proper evaluation of E_area was difficult for the AE waveform showing large and gradual fluctuation caused by the unlubricated bearings. The new parameter E_sd based on width of the amplitude distribution of the AE waveform was introduced to overcome this problem. Finally, it was concluded that the low speed rotating bearings installed in escalators can be diagnosed by means of the newly developed AE technique. The damaged part of the bearings can be identified from the frequency analysis of the AE waveform.

Key words : Escalator, Bearing, Diagnosis, Low rotating speed, Acoustic emission, Noise removal

1. 緒 言

鉄道駅のエスカレータは、2000年（平成12年）11月の「高齢者、身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律」（通称「交通バリアフリー法」という）施行に伴い、順調に整備が進められ、東日本旅客鉄道株式会社が保有する駅エスカレータの台数は、平成28年度時点で1800台を超えている。

これらのエスカレータは、初電から終電まで20時間以上もの長時間稼働、半屋外設置で日照・風雨への暴露、お客様の駆け上がり、駆け下りなど、一般の建物内に設置されているエスカレータよりもはるかに過酷な環境・負荷で稼働している。エスカレータの故障はお客様の安全や円滑な駅構内移動への影響が大きく、設置からの経過年数が10年を超える設備が増えている中で安定稼働を持続するために、定期的な点検において設備の様々な箇

日本機械学会 [No. 16-90] 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩 技術講演会講演論文集 [2017. 1. 19. 東京]

^{*1} 非会員, 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

^{*2} 非会員, JR 東日本メカトロニクス株式会社 (〒151-0053 東京都渋谷区代々木二丁目1番1号 新宿メインズタワー)

^{*3} 非会員, JFEアドバンテック株式会社 (〒663-8202 兵庫県西宮市高畑町3-48)

E-mail of corresponding author:oda@jfe-advantech.co.jp

所の正常・異常状態を把握し、計画的な部品取替計画の策定と実行が非常に重要となってきた。

エスカレータの回転機構部に対しても、定期点検時の保守技術員目視や触診による異音・振動の点検、軸受やチェーンへの給脂とともに、昇降機メーカーの定める周期での部品交換を実施している。しかし、重要部位であるステップ駆動輪は 20rpm 未満、手摺駆動ローラーは 100rpm 未満と非常に低速で回転しているため、五感点検での異常検知には限界があり、突発的故障による緊急停止、修理のための計画外長時間停止といった事態が発生している。そのため、定期点検時に確実にかつ簡便に設備状態を把握し得る診断技術が望まれていた。

2. エスカレータにおける低速回転軸受の診断

回転機械軸受の状態監視技術としては、軸受近傍の振動を測定する振動法が一般的である。しかし、軸回転速度が低下すると、損傷により発生する振動も低下し、検知感度が低下する。そのため、適用できる軸回転速度に下限があり、一般的には 100rpm 程度とされる。本研究で対象とするステップ駆動輪や手摺駆動ローラーは軸回転速度が 80rpm 未満であるため、一般的な振動法の適用は困難である。

そのような低速回転機械に対する状態監視技術として、著者らの一部は、これまでにアコースティック・エミッション（以下、AE）を利用した独自の診断パラメーター E_{area} による診断技術と、その技術を実装したポータブル診断器を開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

そこで本研究では、ステップ搬送機構や手摺ベルト搬送機構という複雑な構造を持つエスカレータの重要部位にある低速回転軸受に同診断技術を適用していくため、多数の実駅設備の AE 測定を実施し、エスカレータ設備を診断する上での問題点の抽出とその解決を図った。

3. ステップ駆動輪軸受の診断技術の開発

3・1 ステップ駆動輪

上部機械室にエスカレータ全体を駆動するモーターを設置する集中駆動型設備では、ステップを搬送するとともに上下端においてステップを反転させる機構にステップ駆動輪が採用されている。軸回転速度は 20rpm 未満と非常に遅い。また、特に上部端においては、駆動系が設置された機械室の奥に位置するという構造上の問題から、取替作業に 20 時間程度の時間を要する場合もあり、保守点検上、非常に重要な部位となっている。

3・2 実駅設備での AE 測定及びその結果

ステップ駆動輪軸受の経年取替工事計画の有る設備を含む 24 駅、93 設備について、上部及び下部ステップ駆動輪軸受 278 箇所の AE 測定を実施した。AE 測定には AE 波形を記録でき、新診断パラメーター E_{area} 等の算出も可能であるポータブル低速回転軸受診断器 MK-560（JFE アドバンテック製）を用いた。測定は、点検時にお客様が乗っていない状態で運転を行って実施した。

取替工事で取り外した状態を確認できたのは、7 駅 14 設備の上部ステップ駆動輪軸受 15 箇所、下部ステップ駆動輪軸受 8 箇所であった。取替工事による軸受状態と取替前後の AE の測定結果を対比すると、以下のような場合があることがわかった。

ケース 1：取替工事前は E_{area} が高く、取り外した軸受に損傷が確認された。

ケース 2：取替工事前は E_{area} が高かったが、取替工事後に新品軸受となっても、 E_{area} が激減しなかった。

ケース 3：取替工事前は E_{area} が低かったが、取替工事時に軸受が破損していることが判明した。

ケース 4：取替工事前後で E_{area} が低いままであった。

3・3 ケース 1（取替工事前後で E_{area} が激減した箇所）

ケース 1 となった箇所については、取替前に測定した AE 波形には、図 1 に例示するように、周期的な振幅変動が見られた。その周期は、多くの場合、外輪損傷周期と一致していた。図 1 の事例は $E_{area}=1\ 018[\text{dB}^2]$ であったが、取替工事で取り外した軸受状態を確認すると、図 2 のように外輪軌道面に広範な剥離状損傷が発生している様子が認められ、AE による推定結果と一致した。軸受によっては、内輪軌道面や転動体にも損傷が発生して

いた。このことから、取替前の測定で軸受損傷に起因して発生した AE を捉えていたといえる。すなわち、AE のパラメーター解析や周期解析で、実設備の軸受の損傷発生を検知可能であることを確認できた。

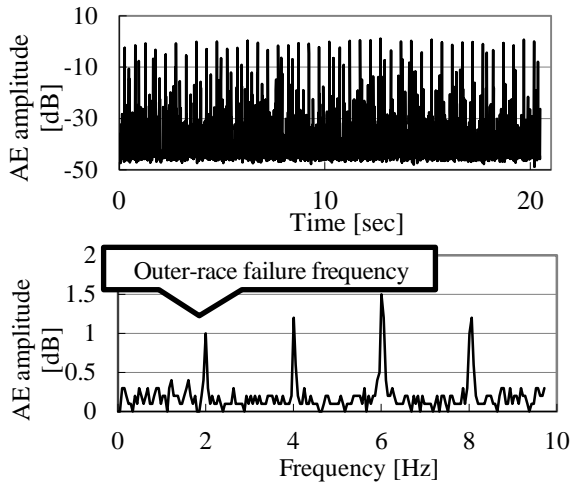


Fig.1 Typical AE waveform (upper) and its frequency spectrum (lower) for the damaged rolling bearing ($E_{area}=1\ 018[\text{dB}^2]$)



Fig.2 Failure on the outer race of the bearing of the step chain sprocket ($E_{area}=1\ 018[\text{dB}^2]$)

3・4 ケース2 (取替前後とも E_{area} が高い箇所) とその対応

3・4・1 ケース2 (取替前後とも E_{area} が高い箇所) の結果

ケース2の例として、軸受取替後の AE 波形及びその周期解析結果を図3に示す。軸回転速度の30倍の周期性を持つ成分が卓越しているが、取替前も同様であった。また、特に下部で顕著だったが、波形の突発ピークの間隔が単純な等間隔ではなく6回に1回変動し、周期解析ではそれによる側帯波が発生していた。なお、転がり軸受の損傷特性周期は、軸回転速度の20倍程度までであるため、この30倍成分は軸受損傷起因のものではない。

これらの周期性と当該設備の構造を比較検討した結果、これらはステップ駆動輪スプロケットとステップチェーンの噛合いにより発生した AE であると考えられた。つまり、ステップ駆動輪は一回転当たり5枚のステップを搬送し、一ステップ当たり6枚の歯が噛合うため、軸回転速度の30倍周期の噛合いノイズが発生し、さらに、6回に1回の揺らぎは、ステップ毎に一本あるステップ保持軸と噛合うことと整合している。このステップチェーン噛合いノイズは軸受診断を阻害するため、診断前に除去しておく必要がある。

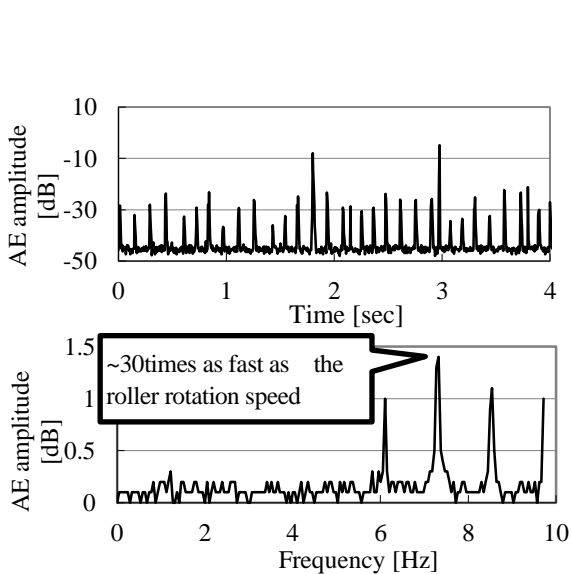


Fig.3 Typical AE waveform (upper) and its frequency spectrum (lower) with meshing noises for the newly replaced bearing of the lower step chain sprocket ($E_{area}=423[\text{dB}^2]$)

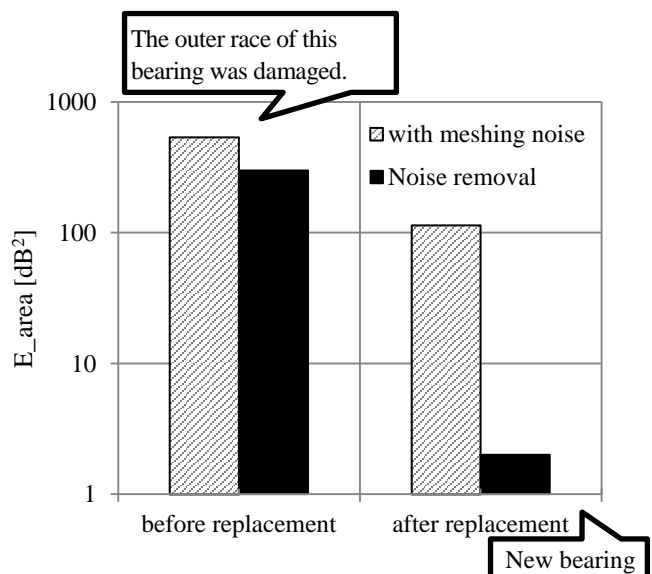


Fig.4 Comparison of E_{area} between without and with removal processing of meshing noises for the AE waveforms before and after replacement of the bearing of the upper step chain sprocket

3・4・2 噛合いノイズ除去手法の開発

厳密に等間隔でない周期パルスからなる噛合いノイズを除去するために、エスカレータ諸元に基づいて AE 波形中の噛合いノイズ有無を自動判定し、噛合いノイズを抽出・除去するアルゴリズムを開発した。軸受診断は、噛合いノイズ除去後の AE 波形から診断パラメータを算出することで行う。噛合いノイズの除去有無による E_area の差異と取替前後の変化例としてステップ駆動輪上部軸受での E_area 算定結果を図 4 に示す。噛合いノイズが重畳したままでは、新品軸受に取り替えても E_area が 100 超であったものが、噛合いノイズ除去ロジックにより、取替前後で E_area が急減する様子が現れた。取替前 AE 波形（ノイズ除去後）では、周期解析結果に外輪損傷周期が現れていたが、実際に取り外した軸受には外輪軌道面に剥離が生じており、診断結果と一致した。よって、本ノイズ除去ロジックにより、噛合いノイズの影響を受けずに、ステップ駆動輪軸受診断が可能となった。

3・5 ケース 3（取替工事前に低 E_area だったが軸受損傷のある箇所）とその対応

3・5・1 ケース 3（取替工事前に低 E_area だったが軸受損傷のある箇所）の結果

ケース 3 は全測定箇所で一箇所だけであったが、取替工事直前の AE 測定では、E_area が非常に低い値であったが、取り外した軸受は、図 5 に示すように潤滑剤が黒化・固化、保持器が破損し、損傷末期状態であった。

測定した AE 波形を図 6 に示すが、突発的・間欠的な大振幅の AE は少ないものの、波形全体が大きく揺らいでおり、その振幅レベルも他の AE 測定結果に比べて高い。これは、損傷に伴う AE が常時、連続的に発生していたことを示唆しており、極度の潤滑不良という状況に符合する。E_area は、損傷による AE のない背景雑音に相当するベース部分から損傷による AE の信号が立ち上がることを想定し、ベース部分からの逸脱成分を損傷による AE の寄与として評価している¹⁾ため、前述のような AE 波形に対しては E_area の値が高くなりにくい。そこで、このような AE 波形に対しても、異常と判定することができる新診断パラメータ E_sd を考案した。



Fig.5 Damaged bearing at the step chain sprocket due to severe unlubrication ($E_{area}=7[\text{dB}^2]$)

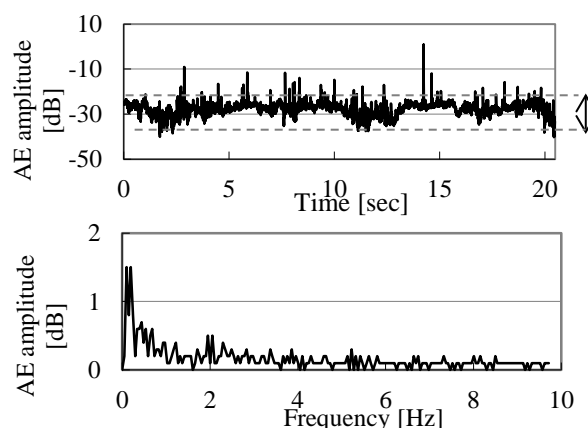


Fig.6 Typical AE waveform (upper) and its frequency spectrum (lower) for the severely unlubricated rolling bearing ($E_{area}=7[\text{dB}^2]$)

3・5・2 新診断パラメータ E_sd による極度の潤滑不良検知

極度の潤滑不良状態の AE 波形の特徴は、AE が連続的に発生して大きく変動し、波形のほぼ全てがベース部分と見なすことができることである。図 6 に破線で示すこの幅は、図 3 で示した正常な軸受や、剥離損傷している軸受の AE 波形におけるベース部分の幅よりもはるかに大きい。そこで、このベース部分の幅に基づいた新たな診断パラメータ E_sd を考案した。図 5 に示した箇所の E_sd は取替前 18.4dB、取替後 5.5dB となり、新品軸受に取り替えた後に大きく低下した。他の E_area が低いデータにおける E_sd と比較しても、この軸受の取替前のデータのみ値が大きいことから、極度の潤滑不良状態の検知として E_sd が有効であると考えられる。したがって、E_area または E_sd の値のいずれかの増大をもって損傷と判断することが適切である。

3・6 ケース 4（取替前後で E_area が低い箇所）

ケース 4 となった箇所については、定期取替工事時に取り外した軸受の状態を確認したが、いずれも軌道面に

損傷は認められなかった。このことから、ケース2、ケース3の場合を除き、エスカレータ設備においても正常な軸受の場合は、 E_{area} が低い値を示すことが確認できた。

3・7 ステップ駆動輪損傷検知のまとめ

軸受取替後の状態確認を実施できた箇所を取替前に測定した AE 波形に上記処理を施した後にあらためて E_{area} または E_{sd} を算出した。損傷状態との対応状況は以下のようになる。

- (1) 顕著な剥離損傷有り (12 箇所) : $E_{area} \geq 100[\text{dB}^2]$ 又は $E_{sd} \geq 15[\text{dB}]$
- (2) 軽微な剥離又は顕著な摩耗痕 (3 箇所) : $E_{area} = 98 \sim 222[\text{dB}^2]$
- (3) 正常 (8 箇所) : $E_{area} < 100[\text{dB}^2]$

軽微な摩耗や顕著な摩耗痕の発生は、軸受の状態として初期の異常であると考え、実設備によって E_{area} または E_{sd} を用いたステップ駆動輪軸受の状態監視が可能であることを確認することができた。

4. 手摺駆動ローラー軸受の診断技術の開発

4・1 手摺駆動ローラー

手摺駆動ローラーは、利用者がエスカレータ利用時に把持する手摺（ハンドレール）をステップと等速で搬送するための手摺駆動ユニットにあり、一つのユニットが三連または四連のローラーで構成されているのが一般的である。軸回転速度は 80rpm 未満で、低速回転設備となる。

4・2 実駅設備での AE 測定における課題

手摺駆動ローラー軸受の経年取替工事計画の有る設備を対象に、ポータブル低速回転軸受診断器 MK-560 にて AE 測定を行った。AE 測定は、点検時に利用者が乗っていない状態で運転を行って実施した。

実駅測定を進める中で、多くの設備で図7に示すように突発パルス状の信号が顕著に重畳することが判明した。周期解析結果から軸回転速度の約 21 倍前後の周期で、手摺駆動ローラーを駆動するスプロケットの歯数に対応することから、駆動チェーンとスプロケットの噛み合いノイズであると考えられた。そして、ステップ駆動輪用に開発したノイズ除去ロジックを適用しても、十分な除去効果が得られないことも明らかとなった。そこで、AE 測定時に噛み合いノイズの影響をできるだけ受けないように、センシングと発生機構の両面からの検討を行った。

4・3 手摺駆動ローラー用の噛み合いノイズ除去技術の開発

4・3・1 噛み合いノイズの周波数特性

軸受損傷に伴い発生する AE は、数十 kHz～数百 kHz の周波数帯域を持つことが知られている^③。それに対し、噛み合いノイズの持つ帯域を、JR 東日本メカトロニクス株式会社昇降機・空調研修センターにて調査した。

研修設備にて噛み合いノイズがある状態で測定した AE 波形を周波数解析した結果、100kHz 未満、特に 50kHz 付近の成分が卓越していることがわかり、この成分が噛み合いノイズであろうと判断できる。そこで、感度のピーク周波数が 100kHz より十分高い AE センサーを新たに開発し、手摺駆動ローラー研修設備で有効性を確認した。新センサーの AE 測定結果は従来センサーに対し明瞭に噛み合いノイズの影響が低減し、センサー改善が有効であることが確認できた。そこで、手摺駆動ローラーの実設備では、この新 AE センサーを用いて測定を行った。

4・3・2 噛み合いノイズの発生機構からの検討

噛み合いノイズの発生メカニズムは、既に述べた通り、手摺駆動ローラー sprocket と駆動チェーンの噛み合いにより発生した AE と考えられる。噛み合いノイズには、①チェーンの張力、②sprocket とチェーンの潤滑状態、が強く影響する。研修設備による評価で、張力が低いほど噛み合いノイズが低減することは確認できたが、実設備においてチェーンの張力を下げて運転ことは適切ではない。一方、チェーン駆動の点検では、必要に応じ給油することから、特に軸受診断用に事前給油して潤滑状態を良くしてから診断を行うことは妥当な措置であろうと考えられた。そこで、駆動チェーンへの給油後に AE 測定を行うこととした。

4・4 実駅設備での手摺駆動ローラー軸受診断結果

前2項で述べた対策をとって、あらためて実駅設備の手摺駆動ローラー測定を5駅9設備51箇所を実施した。噛合いノイズ以外の外乱ノイズの影響があると思われる箇所を除き、 E_{area} は十分低い値となり、対策の有効性が確認できた。さらに、取替前測定において E_{area} が高く、図8に示すようにAE波形に外輪損傷周期が見られる事例があった。取り外した軸受には、外輪軌道面に剥離損傷が発生しており、AEによる損傷推定と一致した。

以上のことから、従来のMK-560による E_{area} 診断に、手摺駆動ローラー用の新センサーの採用、及び測定前の給油実施を加えることよって、手摺駆動ローラー軸受の診断も可能であることが確認できた。なお、既に述べたように、軸受損傷時のAEは数十kHz～数百kHzに及んでいるため、手摺駆動ローラーの噛合いノイズ除去仕様の新AEセンサーを、ステップ駆動輪軸受の診断に使用することも可能であると考えている。

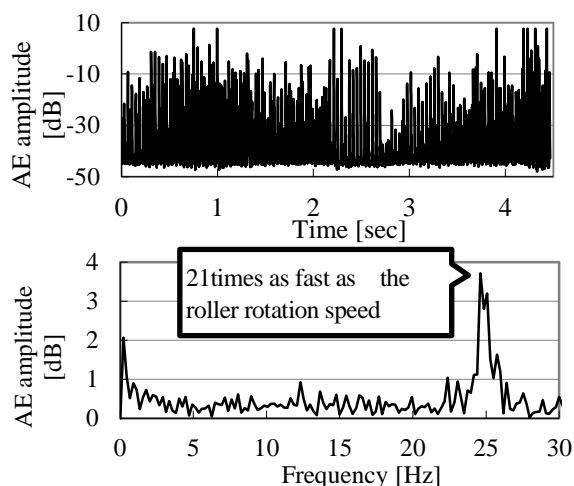


Fig.7 Typical AE waveform (upper) and its frequency spectrum (lower) for the handrail driving wheel bearing ($E_{area}=1793[\text{dB}^2]$)

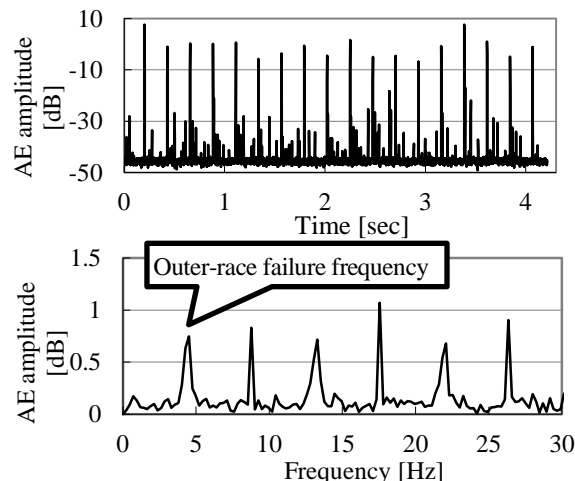


Fig.8 Typical AE waveform (upper) and its frequency spectrum (lower) for the damaged handrail driving wheel bearing ($E_{area}=395[\text{dB}^2]$)

5. 結 語

エスカレータの重要部位であり、低速回転部でもある軸回転速度20rpm未満のステップ駆動輪軸受及び80rpm未満の手摺駆動ローラー軸受に対し、AEを用いた低速回転軸受診断手法の適用化研究を実施した。

ステップ駆動輪では、ステップチェーンとステップ駆動輪スプロケットの噛合いノイズが重畳することがあり、新たに除去ロジックを開発・適用することでその影響を除去して、独自のAEパラメーターである E_{area} により軸受損傷検知が可能であることを示した。また、極度の潤滑不良状態では E_{area} による診断が困難である事例があり、代替の診断パラメーターとしてAE波形の大きな揺らぎに基づく E_{sd} を考案し、その有効性を検証した。

手摺駆動ローラー軸受では、ステップ駆動輪軸受よりさらに顕著な噛合いノイズの重畳が見られたため、センサー周波数特性を適切に変更し、測定前にチェーン給油を実施するという対策もとることで、噛合いノイズの影響を受けず、 E_{area} で軸受損傷を検知できることを確認した。

以上のことから、本研究により適用化を図ったAEによる低速回転軸受診断技術により、エスカレータの重要部位である低速回転軸受の診断が可能であることが実証された。本診断技術は、ポータブル診断器への実装を終え、エスカレータのより安全で安定した運行のために今後活用していく予定である。

文 献

- (1) 小田将広, 吉良耕一, 岡本謙, “低速回転がり軸受診断技術の開発と実設備検証結果”, 日本機械学会第11回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集(2012), pp. 69-72.
- (2) 吉良耕一, “ポータブル低速回転軸受診断器 MK-560の開発”, 検査技術(日本工業出版), Vol.18, No.3 (2013), pp. 60-64.
- (3) 日本非破壊検査協会編, アコースティック・エミッションによる機械診断(日本非破壊検査協会) (2014).