

## 低速回転軸受診断への新 AE 指標の適用

Applying new AE parameters to low speed rotating bearing diagnosis

○小田 将広 吉良 耕一 橋本 博司 渊上 芳樹  
 MASAHIRO ODA KOICHI KIRA HIROSHI HASHIMOTO YOSHIKI FUCHIGAMI  
 JFE アドバンテック株式会社  
 JFE Advantech Co., Ltd.

### 概 要

振動診断が適用困難な低速回転軸受診断に AE 法を適用するため、統計的特徴を表す新指標として、AE 波形の振幅分布から正規分布で近似可能な領域（損傷による AE を含まない）を決定し、そこから外れた領域を損傷による AE 相当部分として数値化した AE 指標  $E_{area}$  を考案した。150rpm 未満の実設備の多数の軸受で AE を測定し、 $E_{area}$  値と軸受状態を比較した結果、 $E_{area}$  によって、損傷前駆現象である異常摩耗から顕著なはく離損傷発生まで検知可能であることを実証できた。AE 検波波形を測定し新 AE 指標を算出する軸受診断装置を開発し、実設備監視に適用中である。

キーワード（損傷評価、信号処理、アコースティック・エミッション、軸受、低速回転機械）

### 1. 緒 言

回転機械の構成要素において損傷発生の度合いの高い軸受に対しては、振動法による設備診断・状態監視技術がほぼ確立し、利用されてきている。しかし、およそ 150rpm 未満の回転数の低速回転機械の軸受に対しては、一般的な振動法の適用が困難であり、代替診断手法が提案されてきている<sup>1)</sup>が、広く利用されている段階にはない。

そこで、著者らは AE 法に着目し、軸受の状態を反映する新しい AE 指標を考案し、150rpm 未満の実設備低速回転設備の転がり軸受診断に適用して、有効性を検証した。さらに、現場で容易に新 AE 指標による診断が可能な低速回転軸受診断器 MK-560 を開発し、実設備の状態監視への展開を図った。

### 2. 軸受診断用 AE 指標の考案<sup>2, 3)</sup>

AE は材料が変形あるいは破壊する際に内部に蓄積された弾性エネルギーを弾性波として放出するもので、軸受を構成する部品のき裂進展や金属面の摩擦・摩耗等に対して感度が高く、転がり軸受やすべり軸受の状態監視への適用例<sup>4, 5)</sup>が報告されている。しかし、現時点でも軸受診断技術として汎用的に利用される状況にはない。その原因の一つとして、軸受診断に適切な AE の指標化が確立していないことが考えられる。そこで、測定者の判断によらず測定データのみから損傷による AE 成分を自動判定し、軸受の状態をわかりやすく評価可能な新しい AE 診断の指標を検討した。

AE は数十 kHz～数 MHz に及ぶ帯域を有しているが、低速回転軸受診断のように数秒～数分という時間長さの連続的な事象を監視するには、AE 波形の信号情報を圧縮して信号処理負荷を下げるのが、診断装置開発上は有益である。そのため、転がり軸受の精密診断と同様に、AE 波形の包絡線を取る検波処理により AE 信号を低周波数化した AE 検波波形から AE 指標を算出することとした。

図 1 に正常な転がり軸受 (50rpm) における実測 AE 検波波形、図 2 に軌道面に剥離が生じた実損傷

軸受 (35rpm) における実測 AE 検波波形を示す (破線は軸一回転の時間長さを示す)。図2のように、軸受到に損傷が生じると、軸回転に伴い振幅の大きな AE が繰り返し発生する。

次に、図1に示した AE 波形の振幅分布を図3に示す。縦軸は頻度を最大頻度で規格化した後に対数化してしている。正常軸受における AE 波形の振幅分布 (頻度の対数化前) は、図中の実線で示した正規分布で近似可能であることが分かる。一方、図2に示した AE 波形の振幅分布を図4に示すが、損傷に起因する AE が多数含まれるため、振幅分布が左右非対称となり、高振幅側頻度が増えている。しかし、最頻度振幅以下は、正常軸受時と同様に正規分布で近似可能であることがわかる。

すなわち、最頻度振幅より低振幅側の振幅分布を正規分布で近似し、それを最頻度振幅で対称に折り返した振幅分布は、損傷による AE を含まない正常時の AE 波形の振幅分布 (仮想正常振幅分布、図中実線) と見なすことができる。そこで、この仮想正常振幅分布から実際の振幅分布が逸脱している領域を抽出し、振幅分布上での面積相当を数値化したものを新 AE 指標  $E_{area}$  とした。

ただし、潤滑剤が黒化・固化し、軸受自体が破損するような極度の潤滑不良を伴う損傷末期状態の軸受では、図5に示すように、AE の周期性はもはや顕著ではなく、波形全体が大きく揺らぎ、その振幅レベルも高くなる。これは損傷に伴う AE が常時、継続的に発生しているためだが、仮想正常振幅分布と損傷 AE との区別が困難で、 $E_{area}$  の適用は原理上困難となる。

一方、AE 検波波形の振幅分布では、頻度の多い振幅領域の幅が正常時よりも広くなる、という特徴があることがわかった。同領域の幅は、 $E_{area}$  算出の際に求める近似正規分布の標準偏差に相当する。そこで、 $E_{area}$  を補完する新診断パラメータとして、近似正規分布の標準偏差を用いた新 AE 指標  $E_{sd}$  も定義した。

### 3. 実設備における新 AE 指標の検証<sup>2)</sup>

前述した  $E_{area}$  を検証するため、実設備の低速回転 (130 rpm 以下) 転がり軸受 (グリス自動給脂) に対し、AE 測定と軸受取替による状態確認 (20 箇所) を実施した。

軸受取替を実施した AE 測定箇所のうち、 $E_{area}$  が 520 (以下、MK-560 測定相当に換算後) より高

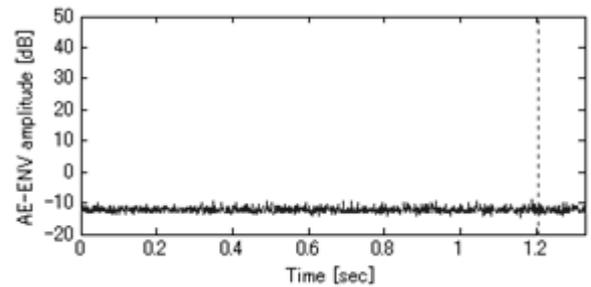


図1 正常な転がり軸受での AE 検波波形

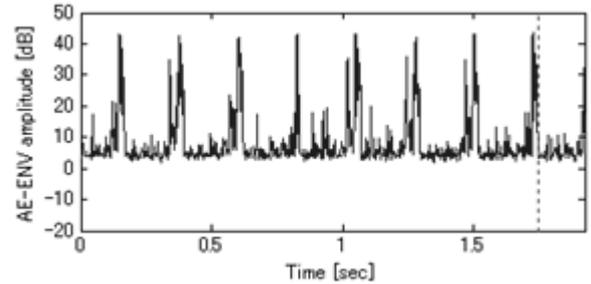


図2 軌道面剥離損傷軸受での AE 検波波形

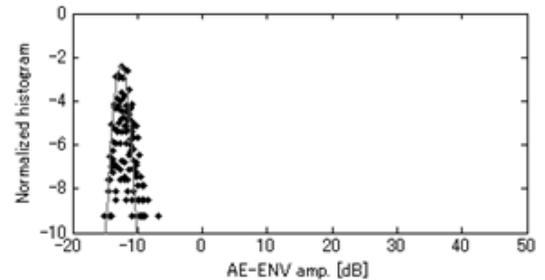


図3 図1の AE 波形の振幅分布

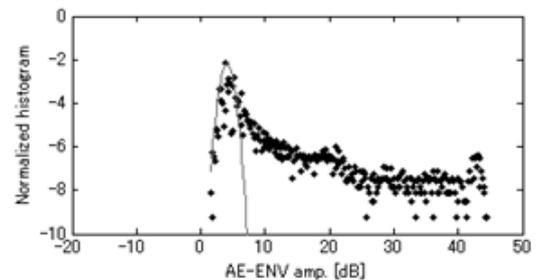


図4 図2の損傷軸受 AE 波形の振幅分布

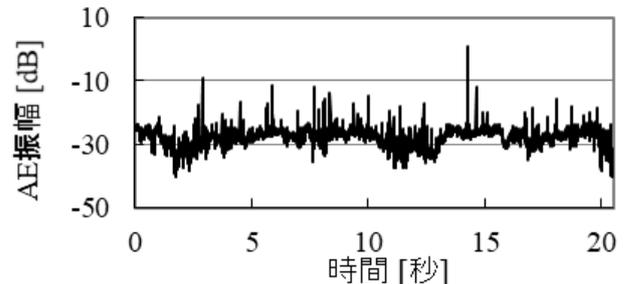


図5 極度の潤滑不良での AE 検波波形例

かった6箇所では、いずれも軸受損傷が発生していた。一方、それより低かった14箇所では、微小なスポット傷の1箇所を除き、顕著な摩耗痕はあっても軸受損傷はなく、 $E_{area}$ の大小と軸受状態に関連性が見られた。

図6に測定結果の一例として、軸回転速度50 rpm、取替前の $E_{area}=977$ のAE検波波形、振幅分布、周波数スペクトルを示す。取り外した軸受には図7に示すように特に外輪軌道面に顕著な剥離損傷が見られ、取替後の $E_{area}$ は0に低減した。これらの結果は、取替前のAEが損傷起因であることを示している。

これらの現場測定結果から、低速回転機械での軸受診断における新AE指標の有効性を検証できた。新AE指標による軸受診断は、高速サンプリングやAEヒット収集が不要で、一般的な振動計と同様のハードで実現可能である。

#### 4. 低速回転軸受診断器の開発とその適用事例

##### 4. 1 AE法に基づく低速回転軸受診断器の開発

現場での軸受診断作業の効率化のため、軸回転速度設定のみで新AE指標による軸受診断が可能な低速回転軸受診断器MK-560 (ES)を開発し、実設備状態監視への展開を図った。(ES)は後述のエスカレーター診断用モデルである。

MK-560 (ES)は、図8に示すようにマグネット式AEセンサーと小型軽量の測定器本体で構成され、AE検波波形を計測、新AE指標を算出・表示・記録、さらにAE検波波形とFFTの表示・記録が可能である。

##### 4. 2 製鉄所薄板製造ライン

JFEスチールの薄板製造ラインの低速回転ロール軸受診断は、当初グリス分析を採用していたが、軸受トラブルによる年間数十時間程度の設備停止が発生していた<sup>6)</sup>。そこで、2007年からAE診断の導入を検討し、2011年度から低速回転軸受診断器MK-560による状態監視を開始し、現在まで軸受起因のトラブルは発生しておらず、設備停止時間ゼロを継続中である。

##### 4. 3 鉄道駅舎エスカレーター<sup>3)</sup>

大都市圏鉄道駅のエスカレーターは、長時間稼働、半屋外設置、乗降利用者の多さなどによる過酷な環境・負荷で稼働しており、その安定稼働を維持するために、定期的な点検での設備の状態把握と計画的な保全の実施が非常に重要となってきた。しかし、構造上の重要部位の一つであるステッ

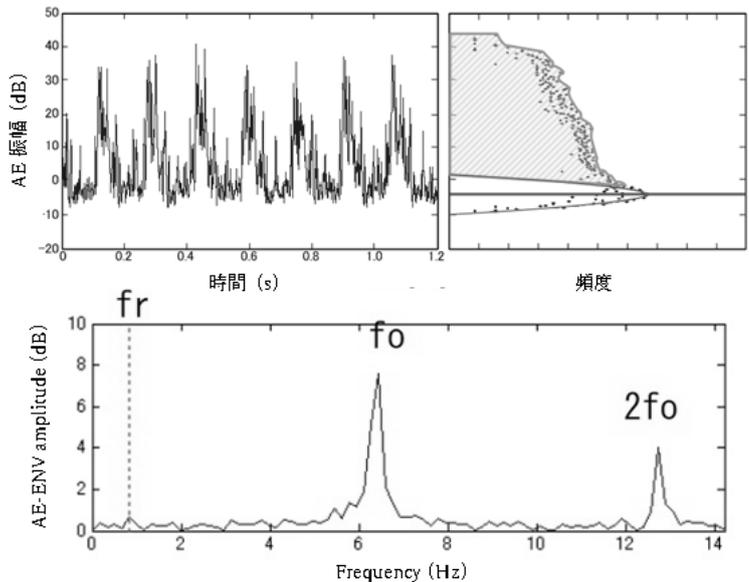


図6 実設備 (50rpm) 損傷軸受での (左上) AE波形、(右上) 振幅分布、(下) FFT結果データ周波数スペクトル ( $f_o$ : 外輪損傷周波数、 $f_r$ : 軸回転速度) の例

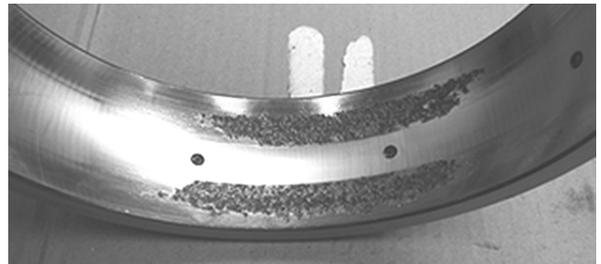


図7 AE測定後に取り外した軸受の損傷状況



図8 MK-560 (ES) 外観

ブ駆動輪は 20rpm 未満の低速回転のため、五感点検や振動診断での異常検知には限界がある。

そこで、新 AE 指標適用検証のため、首都圏鉄道駅にあるエスカレーターステップ駆動輪の AE 診断を実施した。取替前に測定した AE 波形には、図 9 に例示するように、周期的な振幅変調が見られる箇所があった。その周期は、多くの場合、外輪損傷周期と一致していた。図 9 の事例は  $E_{area}=1018$  であるが、取り外した軸受には、図 10 に示すように外輪軌道面に広範な剥離損傷が発生しており、AE 診断結果と一致した。検証した軸受取替 23 箇所のうち、15 箇所ではく離ないし顕著な摩耗が見られたが、 $E_{area}$  も、極度の潤滑不良の 1 箇所を除く損傷軸受で 100 超であり、それ以外の箇所では 100 未満であったことから、診断指標として有効であることが確認できた。損傷末期の極度の潤滑不良箇所では、 $E_{sd}$  が有効であることも確認できた。以上により、エスカレーターの予防保全における AE 診断の有効性を確認できた。

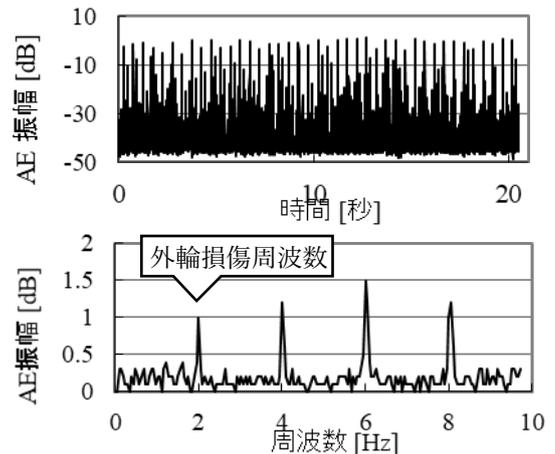


図 9 エスカレーター軸受実測 AE 検波波形 (上) と周波数スペクトル (下)



図 10 AE 測定後に取り外した軸受の損傷状況

## 5. 結 言

AE 法を低速回転軸受診断に適用するため、新 AE 指標  $E_{area}$ 、 $E_{sd}$  を考案し、150rpm 未満の実設備に適用して軸受診断に有効であることを実証した。現場で簡単に新 AE 指標を測定できる小型可搬型の低速回転軸受診断器 MK-560 を開発、製鉄所薄板ラインの軸受診断に適用し、ダウンタイムゼロを継続中である。また、鉄道駅エスカレーターにも AE 診断を適用し、予防保全に有効であることを確認した。

## 6. 参考文献

- 1) 例えば、森圭史、廖志強、唐海紅、宋瀏陽、陳山鵬：衝撃的な振動を伴う低速回転機械軸受診断技術の検証および診断装置システムの開発、日本機械学会 第 20 回評価・診断に関するシンポジウム予稿集、pp. 28-36、(2022)
- 2) 小田将広、吉良耕一、岡本謙：低速回転転がり軸受診断技術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、pp. 69-72、(2012)
- 3) 谷雅信、山田哲也、小田将広、淵上芳樹、橋本博司：ポータブル AE 用軸受診断技術の開発と実設備検証、日本機械学会 技術講演会 昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩 講演論文集、No. 102、(2017)
- 4) 近藤浩之、阿部由樹雄、進藤誠：石炭炊き火力発電所における運炭設備用ベルトコンベヤの軸受診断、平成 22 年度創立 60 周年記念火力原子力発電大会論文集 1-1、(2010)
- 5) 三上雅生：簡易型 AE 法によるすべり軸受診断システムの開発、INSS JOURNAL Vol. 19 2012 NT-16、(2012)
- 6) 高田基樹、小田将広：低速軸受の AE 計測による損傷診断、JFE 技報、No. 44、pp. 18-21、(2019)