

Development of low-speed rotating bearing diagnostics and its field verification at actual facilities

○小田将広 (JFE アドバンテック) 吉良耕一 (JFE アドバンテック)
岡本 謙 (JFE スチール)

Masahiro ODA and Kohichi KIRA, JFE Advantech Co., Ltd., 3-48 Takahata-cho, Nishinomiya
Ken OKAMOTO, JFE Steel Corp., 1-1 Ohgishima, Kawasaki-ku, Kawasaki

Key Words: *Low-speed rotating bearing, Diagnostics, Acoustic emission, Quantitative index*

1. はじめに

回転機械の構成要素においても損傷発生の度合いの高い軸受に対しては、振動法を中心とする設備診断・状態監視手法がほぼ確立し、利用されてきている。しかし、およそ 100rpm 未満の回転数の軸受については、振動法の適用が困難であり、それに代わる診断手法が提案/利用^(1,2)されてきているが、広く利用されている段階にはない。

現状で低速回転軸受の状態監視をするための主な測定対象としては以下が挙げられる；(1) 振動、(2) 温度、(3) 潤滑剤中異物、(4) アコースティック・エミッション(AE)。著者らは、この中で AE に着目し、従来の AE 診断の問題点を解消しつつ、AE により軸受の状態を反映する指標を定量的に抽出する新しい AE パラメータを考案し、軸受診断に用いる手法の開発を行った。開発手法については、30~90rpm の実稼働設備のころ軸受の診断に適用し、新パラメータと実際の軸受状態の対比から、その有効性を検証した。

2. AE による軸受診断への新パラメータの提案

2・1 従来の AE パラメータにおける問題点

AE は材料中の亀裂進展や金属面の摺動・摩擦・摩擦等に對して高感度を有していることから、低速回転軸受やすべり軸受の状態監視への適用が試みられ^(1,3)、個々の事例においては有益な診断結果が得られてきた。しかし、現時点において、振動法に匹敵する診断ツールとして確立するには至っていない。著者らはその原因として、(1) AE 測定ハードの制約、(2) 診断に利用する適切なパラメータの不足、があったと考えている。前者は、近年の部品の小型化、高機能化に伴い、AE 測定装置自身の小型化が進み、その制約は解消されつつある。そこで、後者の、AE による軸受診断により適した新しい AE パラメータの考案を検討した。

すなわち、発生した AE は、その発生源となる事象の情報を含んでいるが、AE を設備診断に用いるには、その AE の持つ情報 (AE 波の特徴) を指標化して定量的に抽出する必要がある。そのための AE パラメータとしてはこれまででも振幅、持続時間、ヒット率などが利用されてきている⁽⁴⁾。

しかし、これらの数値化された特徴が、検知したい事象、すなわち軸受の状態とどのような相関を持っているかについては、定性的には損傷が進展すると AE パラメータも大きな値を取ることが推測できるものの、軸受種類の多様性や運転状態の差異を鑑みれば、一義的な相関を得ることは非常に難しく、直観的にもわかりにくい。

特に、ヒット率や持続時間といった AE パラメータは、その抽出のための振幅閾値を設定する必要があり、振幅閾値を変えれば AE パラメータの値も大きく変わってしまう。検出閾値を低くして感度を高めると過検知の恐れがあり、逆に閾値を高くすると見逃しが増える恐れがある、というように、その設定が診断結果に大きく影響してしまう。その設定自由度ゆえに軸受状態と AE パラメータの一義的な関係付けを逆に困難にしていると考えられる。

そこで、(1) 直感的に分かりやすい、(2) 測定データから閾値を自動決定できる、(3) 統一的な尺度で評価できる、(4) 過敏な応答をしない、という点を念頭に、新しい AE 診断指標の導出を検討した。

2・2 新しい AE パラメータ

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 波形の周波数情報を圧縮して取り扱うことが有利である。このためには、AE 波形の包絡線を取る検波処理による低周波数化が一般に用いられる。

図 1 に正常な転がり軸受における AE 検波波形、図 2 に軌道面に剥離が生じた損傷軸受における AE 検波波形を示す (破線で示す縦線は軸一回転の時間長さを示す)。このように、軸受到損傷が生じると、軸回転に伴い振幅の大きな AE が繰り返し発生する。したがって、最も単純な診断用 AE パラメータとしてはピーク振幅が考えられるが、ノイズレベルや変動幅が一律ではないため、管理は困難である。

振幅情報の有効性を生かしつつ、より汎用的な指標とするために、正常時にあるべき AE 波形と損傷軸受時の AE 波形との差異を数値化し、指標とすることを検討した。

図 1 に示した AE 波形の振幅分布を図 3 に示す。縦軸は頻

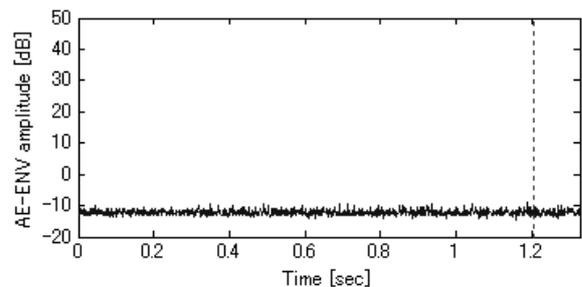


Fig. 1 Typical AE envelope waveform on a normal rolling bearing (50rpm)

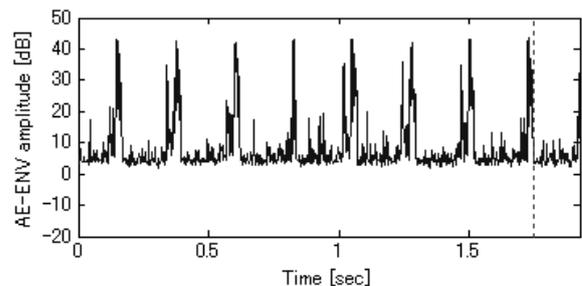


Fig. 2 Typical AE envelope waveform on a damaged rolling bearing (34rpm)

度を最大頻度で規格化した後に対数化している。これより、正常軸受における AE 波形の振幅分布は、正規分布で近似可能であることが分かる。

さらに、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、最頻度振幅付近は、図3と同様に正規分布的であることが分かる。すなわち、損傷軸受において高振幅の AE が頻発している状態であっても、ベースノイズ付近は正常軸受と同様のノイズ成分が存在しているのである。そして、最頻度振幅より低振幅側の分布は、正常軸受同様正規分布で近似することができる。

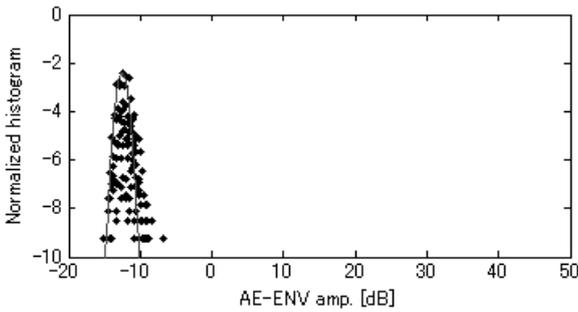


Fig. 3 Typical amplitude histogram of AE envelope waveform on the normal rolling bearing (Fig.1) and estimated normal distribution

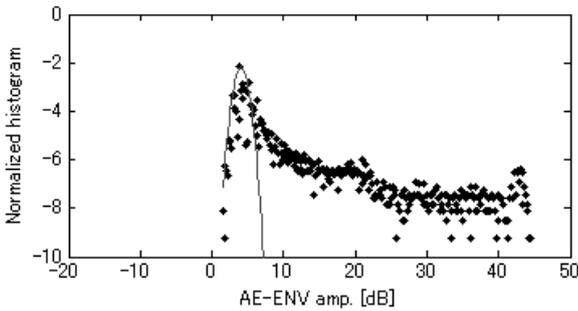


Fig. 4 Typical amplitude histogram of AE envelope waveform on the damaged rolling bearing (Fig.2) and estimated normal distribution

このことから、損傷指示の有無によらず、最頻値振幅より低振幅側の振幅分布を正規分布で近似し、それを最頻値振幅で対象に折り返した分布は、正常時の AE 波形の振幅分布(仮想正常振幅分布)であると見なすことができる。図3、図4に示す実線が、正規分布近似に基づく仮想正常振幅分布である。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範囲を抽出、数値化する。

以上より、『正常時にあるべき AE 波形から逸脱した高振幅成分の量』を数値化する新しい AE パラメータ『E_area』は、概略以下の手順で算出される；

- (1) 規定の軸回転分の時間長さの AE 検波波形を測定する。
- (2) AE 検波波形の振幅分布を求める。
- (3) 振幅分布の最頻値振幅を求める。
- (4) 最頻値振幅より低振幅側の頻度分布を正規分布で近似し、それを最頻値振幅より高い側に折り返して、仮想正常振幅分布を決定する。
- (5) 仮想正常振幅分布の頻度に余裕度を乗じた閾値関数を設定し、それを上回る頻度を有する範囲について、最

頻度振幅からの相対振幅に基づく振幅重み付き面積を算定する。

この算定法のメリットは、AE パラメータの導出に頻出する『(正常時の) ノイズレベル (閾値)』を測定者が与える必要が無く、測定したデータ自身から仮想的な正常レベルが得られる点にある。また、頻度を規格化する、面積を求める際の振幅を最頻値振幅からの相対振幅にするなどの規格化により、測定対象や測定環境の影響を受けにくい判定も可能になると期待できる。

3. 実設備による新パラメータ E_area の検証

3・1 実設備による検証法

汎用型 AE 測定装置を用いて、実設備の低速回転がり軸受の AE 測定を実施し、新パラメータ E_area の妥当性を検証した。対象設備概略は以下の通りとなる。

- ・軸受種別：自動調心ころ軸受(グリス自動給脂)
- ・軸回転速度：30~90rpm(設備による。一部設備は130rpm)

汎用側 AE 測定装置は、JFE アドバンテック(株)製 AE 絶縁劣化診断装置 AE-210 をベースにフィルタ、ゲインを改造し、さらにセンサ、プリアンプを汎用品に変更し、長時間の波形記録が可能なデータロガー(EZ7510、(株)NF回路設計ブロック製)を組み合わせたものである。

AE センサはカプラント(グリス)を受波面に塗布し、軸受箱の取り付け面に押し付けて設置した。AE の RF 波形は、軸が 10 回以上回転する時間長さでデータロガー(1MHz サンプリング)に記録した。

ロガーに記録された測定波形は、デジタル処理で総データ点数が回転数によらず 10 回転分相当時間で約 10,000 点になるように区間を分けて最大値を探索して検波する方法によりダウンサンプリングしてから、前述の算定法に基づいて E_area を算定した。

AE 測定は計画的な設備停止の前後で行い、設備更新に加え E_area が高い値を示した個所で軸受取替を実施し、E_area 値と取り外した軸受状態の対比を行った。

測定は延べ 363 回実施したが、同一軸受に対してほぼ 4 回、約一年半にわたる経時変化も確認した。

軸受取替は 20 箇所を実施し、以下のように軸受到損傷が発生していたことが確認できた。

- (1) 内外輪や転動体に顕著な損傷あり・・・5箇所
- (2) 軌道面に微小なスポット傷あり・・・2箇所

また、損傷ではないが、軌道面負荷域に顕著な磨耗痕が生じている軸受も散見された。

3・2 実設備による検証結果 1 : E_area の有効性

測定した AE 波形から求めた E_area を、値の大きい順に並び替えた結果を図5に、高 E_area 値部分の拡大を図6に示す。両図で、AE 測定直後の取替で損傷が確認された軸受、磨耗あるいは正常と確認された軸受、取り替えていない使用中の軸受の3種類を分けて示した。なお、図5、図6には、同一箇所でも時期を変えて複数回測定した結果も含んでいる。

この図より明らかなように、E_area はゼロ付近から最大 5,000 程度までの変化を示した。軸受取替を実施した箇所では E_area がおよそ 1,500 より低かった 13 箇所では、微小なスポット傷があった 1 点を除き、磨耗は見られるものの剥離損傷のある事例はなかった。後述するように E_area が数十と低い箇所では、軸受到異常は確認されなかった。

一方、E_area が 1,800 より高い値となった箇所はいずれも顕著な軸受損傷が発生していた。軸回転速度が数十 rpm と遅くても損傷面と転動体の接触や剥離の進展等により AE

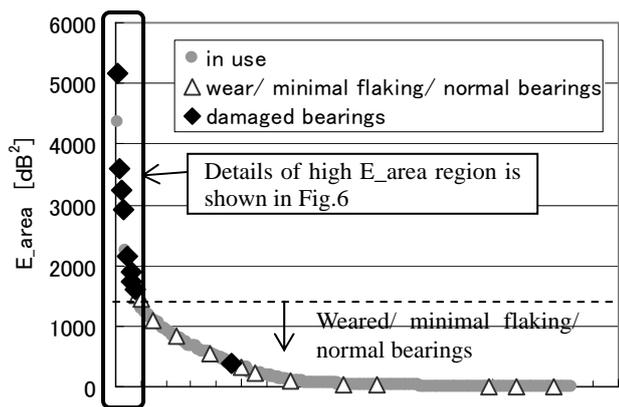


Fig. 5 Range of evaluated E_area

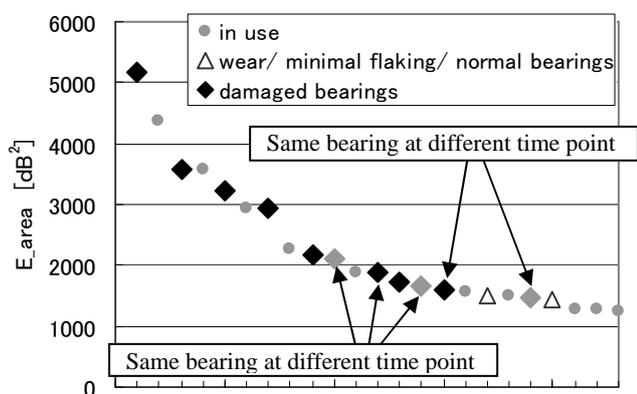


Fig. 6 High E_area region and corresponding bearing status

が発生し、それを適切に数値化することで、軸受の異常を検知できた、といえる。

E_area が 1,600 前後では、軸受損傷が生じていた事例以外に、損傷は発生していないが、軌道面に顕著な磨耗痕が生成していた事例があり、損傷の予備軍であったと考えられる。AE は金属面同士の接触、摺動、磨耗によっても発生することから、顕著な磨耗痕が生成した軸受においては、軸受の潤滑状態が適切な状態ではなく、軌道面の磨耗が促進される状態、すなわち損傷の前駆現象を AE により検知したといえる。

以上のことから、100rpm 以下の軸回転数であっても、低速回転軸受の異常状態を、AE を利用した E_area で検知できることが確認できた。

一方、今回の微小なスポット損傷の一例での E_area は磨耗が顕著な軸受よりも低くなっていた。したがって、微小な損傷と顕著な磨耗進行の危険度としての区別は E_area では困難であった。E_area は、顕著な損傷発生を検知、ついで顕著な磨耗進行の検知、という目的に適している。

3・3 実設備による検証結果 2 : AE 測定結果と軸受状態との対比例

取替前軸受の AE 測定結果、取り外した軸受の状態、軸受取替後の AE 測定結果について、代表的な事例を以下に示す。グラフの縦破線は軸一回転の時間、または軸回転周期である。

(1) 外輪・転動体・内輪軌道面に顕著な損傷発生事例

-測定時軸回転速度=33rpm

-取替前 E_area=3,584 / 取替後 E_area=6

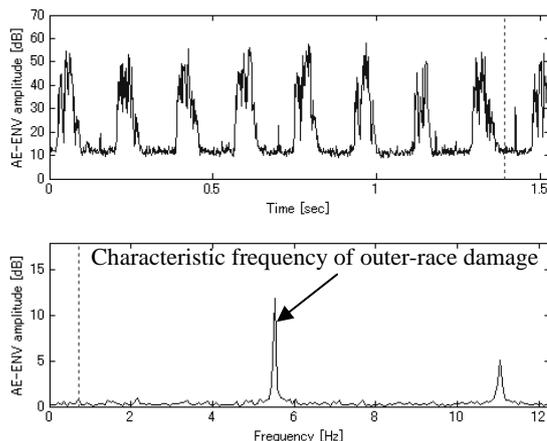


Fig. 7 Example 1 (33rpm/E_area=3,584) : (upper) measured AE waveform and periodicity spectrum, which reveals outer-race damages, (lower) photo of the removed bearing; terrible flaking on the outer race as well as damages on the inner race and rolling elements were observed.

-測定時軸回転速度=33rpm

-取替前 E_area=3,584 / 取替後 E_area=6

図 7 に示す本事例では、得られた E_area が 3,600 程度と非常に高く、かつ測定 AE 波形に顕著な周期性が見られ、周期性解析では、軸受仕様から求まる外輪損傷周期とその高調波に対応する卓越成分が見られた。測定後に軸受取替を実施し、状態を確認した結果、外輪軌道面に顕著な剥離、さらに内輪軌道面全体や転動体軌道面にも顕著な剥離損傷が発生していた。軸受取替後の E_area は 6 に激減しており、E_area が軸受損傷を的確にとらえていることが確認できた。

(2) 外輪軌道面に顕著な磨耗痕

-測定時軸回転速度=49.7rpm

-取替前 E_area=1,503 / 取替後 E_area=8

図 8 に示す本事例では、得られた E_area が 1,500 程度とやや高く、測定 AE 波形にも多数の AE の発生が認められるが、軸受損傷に起因するような周期性は、AE 波形、周期性解析とも見られなかった。測定後に軸受取替を実施し、状態を確認した結果、外輪軌道面、内輪軌道面、転動体軌道面に顕著な磨耗痕が見られたが、剥離等の損傷は認められなかった。

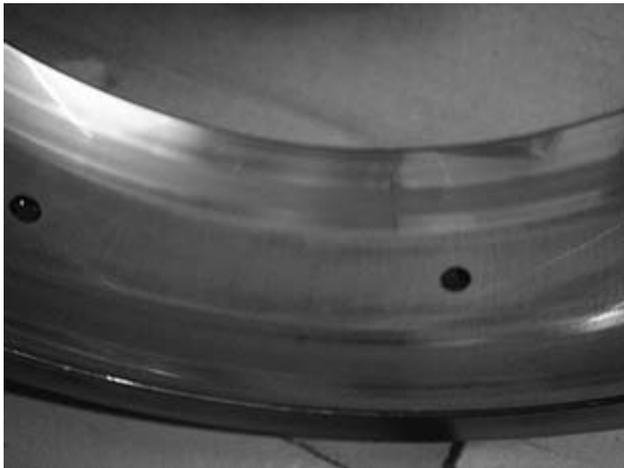
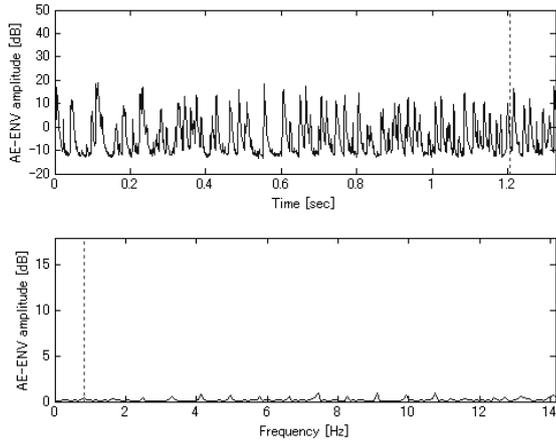


Fig. 8 Example 2 (49.7rpm/ $E_{area}=1,503$) : (upper) measured AE waveform and periodicity spectrum, (lower) photo of the removed bearing; noticeable wear on the outer race was observed.

当該部位も、軸受取替後は E_{area} が 8 に低下し、軸受状態を反映した AE を E_{area} でとらえていることが確認できた。摩耗促進の原因は明確になっていないが、 E_{area} を監視することで状況変化を把握することができると考える。

(3) 軸受に異常なし (低 E_{area} 箇所)

-測定時軸回転速度=65.7rpm

-取替前 $E_{area}=24$ / 取替後 $E_{area}=8$

図9に示す本事例では、得られた E_{area} が 24 と十分低く、測定 AE 波形にも顕著な指示は見られなかった。測定後に軸受取替を実施し、状態を確認したが、異常は認められなかった。取替後は E_{area} が 8 と取替前よりやや低下したが、いずれも正常範囲と考えられる。

4. 結論

低速回転軸受の状態監視のため、微視的な損傷や摺動・磨耗に感度が高く、応答の速い AE 測定に基づく新しい AE パラメータを考案し、実設備において、述べ 363 回の測定を実施し、その有効性を検証した。この結果、以下の結論を得た。

(1) E_{area} の高い箇所ではいずれも顕著な軸受損傷が発生していた。 E_{area} の低い箇所では、軸受状態に異常は見られなかった。その中間の E_{area} の箇所では、軌道面に顕著な磨耗痕が生成している事例が見られた。こ

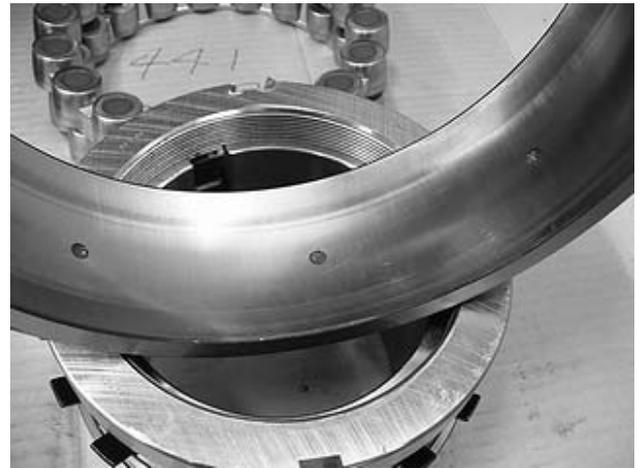
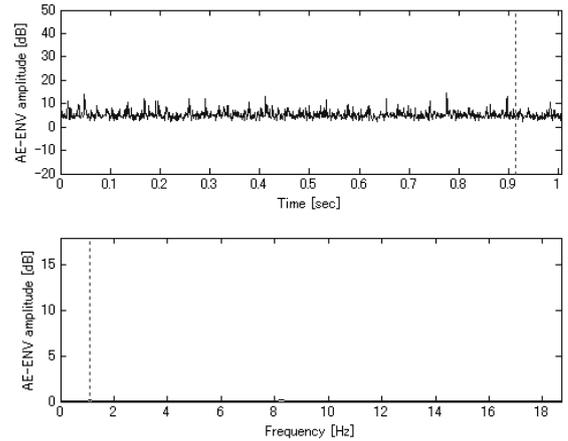


Fig. 9 Example 3 (65.7rpm/ $E_{area}=24$) : (upper) measured AE waveform and periodicity spectrum, (lower) photo of the removed bearing; no damages were observed.

れらのことから、AE 測定に基づく E_{area} により、低速回転軸受の状態を監視し、異常状態を検知できると判断できる。

- (2) 軸受に損傷が発生していなくても、 E_{area} はある程度高い値を示すが、それは軌道面に顕著な磨耗を起こすような潤滑が適切ではない使用状況にあることを示唆するものである。
- (3) AE 検波波形を周期解析した結果は、軸受に発生した損傷に伴う特性周期を良く一致した。 E_{area} とともに波形の周期解析を併用することで、診断の確度を向上させることができる。

5. 参考文献

- (1) 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 CD-ROM (2010), 1-1.
- (2) 橋本和也, 宮崎修治, 陳山鵬, “低速軸受の異常検知法”, 日本機械学会第 4 回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, (2005), pp.67-69.
- (3) 井上紀明, 尾崎研吾, 佐藤式也, 米山隆雄, 掛札優, 昼岡修一, “圧延機用すべり軸受の AE による損傷診断技術”, 川崎製鉄技報, Vol.17, No.3 (1985), pp.394-400.
- (4) 日本非破壊検査協会編, “アコースティック・エミッション試験 II”, (2008).