

低速軸受の AE 計測による損傷診断

Damage Diagnosis of Low Speed Rotating Bearings by AE Measurement

高田 基樹 TAKADA Motoki JFE スチール 東日本製鉄所 (千葉地区) 設備部 保全技術室 主任部員 (副課長)
小田 将広 ODA Masahiro JFE アドバンテック 商品技術開発センター 技術開発部長・博士 (工学)

要旨

従来から回転機械等には多くの転がり軸受が使われており、その診断手法の一つとして振動法を用いた設備診断や状態監視手法が確立され広く利用されているが、100 rpm 以下の低速回転軸受には振動法の適用が困難であり、代替する診断手法も現在のところ確立されていない。そこで、低速回転軸受の状態監視に有効な手法の一つとしてアコースティック・エミッション (AE) に着目し、従来の AE 診断の問題点を解消しつつ、低速回転軸受の損傷状態を定量的に診断できる診断手法を開発したので、適用事例と併せて紹介する。

Abstract:

Equipment diagnosis and condition monitoring techniques using vibration method have been established and widely used as diagnosis methods for rolling bearings used for rotary machines, etc. However, applying vibration method to slow-speed rolling bearings at 100 rpm or less is difficult, and alternative diagnostic methods are not widely known at present. Hence, we focused on acoustic emission (AE) as one of the effective methods for monitoring slow-speed rolling bearing condition, and introduce development of quantitative diagnosing method that enables us to diagnose damage state of slow-speed rolling bearing and application examples of the developed diagnosing technique while solving conventional issues with AE diagnosis.

1. はじめに

従来から回転機械等には多くの転がり軸受が使われており、その診断手法の一つとして振動法を用いた設備診断や状態監視手法が確立され広く利用されている。しかし、振動法による軸受の診断にはある程度の軸受回転数が必要であることから、100 rpm 未満の回転数の低い軸受には振動法の適用が困難で、代替する診断手法も現在のところ確立されていない。

低速回転軸受の状態監視に有効な手法としては温度監視、潤滑油中の異物分析、アコースティック・エミッション (AE) などが挙げられる。本報では、それらの中で初期故障状態に対して最も感度が高くかつ計測操作が容易と考えられる AE に着目し、従来の AE 診断の問題点を解消しつつ、低速回転軸受の損傷状態を定量的に診断可能な診断手法を開発したので、その適用事例と併せて紹介する。

2. AE による軸受診断の新手法の開発

2.1 従来の AE 診断の問題点

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

成する部品の亀裂進展や金属面の摩擦・摩耗等に対して感度が高く、低速回転軸受やすべり軸受の状態監視に適用されている。しかし、現時点で診断ツールとして確立するまでには至っていない。その原因として、測定器ハードの制約ならびに診断指標の不明確さが挙げられる。前者は、近年部品の小型化や高性能化によって解消しており、後者は、今回新たに開発した AE パラメータを採用することで解消できる。

AE は、その発生源となる現象の情報を含んでおり、設備診断に用いるためには、その AE の持つ情報を指標化して定量的に抽出する必要がある。これまで AE パラメータとしては、振幅、周波数スペクトル、持続時間、到達時間差、累積エネルギー、事象率などが利用されており、それぞれのパラメータで反映する情報の種類が異なることが知られている。

しかしながら、これらのパラメータから得られる情報が、それぞれ軸受の状態とどのような相関を持つかについて明確にできていない。定性的には損傷が進展すると AE パラメータも大きな値となることが推測できるものの、軸受種類の多様性や運転状況の変化によってこれらのパラメータが異なるため、汎用的な関連性を見いだせず、また瞬時にわかりにくいという問題がある。そこで、瞬時にわかり易く、測定データのみから閾値を自動決定し、軸受の状態を評価できるという点を念頭に置き、新しい AE 診断の指標を開発した。

2019 年 3 月 19 日受付

2.2 新しい AE パラメータの開発

AE は一般的に数十 kHz～数 MHz の周波数帯域を持つが、低速回転軸受のように 1 回転あたりの時間が数秒～数分という長さとなる場合、連続的な事象の監視に必要な測定データ量が膨大になるため、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的に用いられている。

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正常でない転がり軸受における AE 検波波形を示す。ここで、図中の破線で示す縦線は、軸一回転の時間を表す。図 2 で示すように、軸受に損傷が生じると、軸回転に伴い振幅の大きな AE が繰り返し発生している。この結果から、診断用 AE パラメータとしてピーク振幅の大きさをを用いることが考えられるが、ノイズレベルや回転数の変動における振幅変動幅の影響を考慮すると管理が困難である。そこで、振幅情報を生かしつつさらに汎用的な指標とするために、正常時にあるべき AE 波形と損傷時の AE 波形との差異を数値化、指標化した。

図 1 に示した AE 波形の振幅分布を図 3 に示す。縦軸は頻度を最大頻度で規格化した後に対数化を行っている。これにより、正常な軸受における AE 波形の振幅分布は、正規分布で近似できることがわかる。さらに、図 2 に示した AE 波形の振幅分布も同様に図 4 に示す。図 4 からわかるように、損傷に起因する AE 波形のため振幅分布が非対称となり、図 3 に比べ高振幅側頻度が増加している。しかし、最頻度振幅付近は、図 3 と同様に正規分布で近似できることから、軸受が損傷した場合は、高振幅の AE 成分と、正常な軸受と同様のベースノイズの AE 成分の両方が存在していることがわかる。

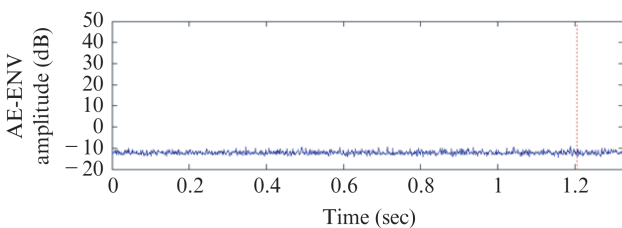


図 1 軸受の AE 波形例 (50 rpm)

Fig. 1 AE waveform example of bearing (50 rpm)

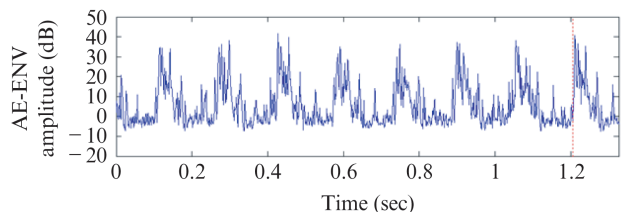


図 2 損傷軸受の AE 波形例 (34 rpm)

Fig. 2 AE waveform example of damaged bearing (34 rpm)

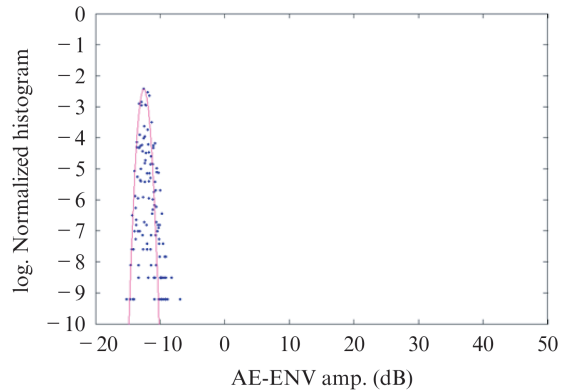


図 3 図 1 における AE 波形の振幅分布

Fig. 3 Amplitude distribution of AE waveform in Fig. 1

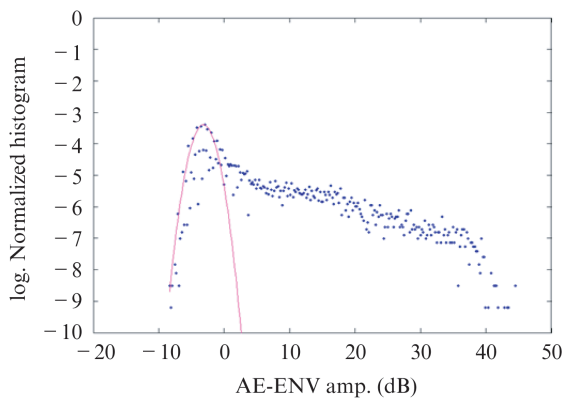


図 4 図 2 における AE 波形の振幅分布

Fig. 4 Amplitude distribution of AE waveform in Fig. 2

そこで、軸受の状態に関わらず、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象に折り返した分布を正常時の AE 波形の振幅分布と見なし、図 3、図 4 の実線部とする。この正常振幅分布から逸脱している範囲を抽出・数値化し、このパラメータを E_{area} とした。

このパラメータの利点は、測定時に測定したデータ自身から正常振幅分布を自動的に推定するため、個々の測定で検出されるノイズレベルの考慮が不要な点である。また、軸受種類の多様性や運転状況の変化によって影響を受けることがないため、わかり易い指標となっていることが特徴である。この新パラメータ E_{area} を用いて、実際の設備で軸受異常を検出することが可能か検証を行った。

3. 実設備による新パラメータ E_{area} の検証

3.1 実設備による検証方法

前述した E_{area} を検証するため、汎用型 AE 測定装置を用いて、実設備の低速回転転がり軸受の AE 測定を実施した。対象設備の概略は以下の通りである。

- ・軸受種別: 自動調芯ころ軸受 (グリス自動給脂)

・軸受（内輪）回転速度：30～130 rpm

E_area の検証に用いた汎用型 AE 測定装置は、JFE アドバンテック製 AE 絶縁劣化診断装置 AE-210 をベースに、長時間の波形記録が可能なデータロガーを組み合わせたものを使用した。

また、ロガーに記録された測定波形は、デジタル処理で回転数に関わらずデータ点数を一定とし、最大値を探索して検波処理を行い、前述の算定法に基づいて E_area を算出した。

延べ 363 回測定し、開放点検の結果、以下のように軸受に損傷が発生していたことを確認した。

- (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、損傷する手前の、軌道面負荷域に顕著な摩耗痕が生じている軸受も確認できた。

3.2 実設備による E_area の有効性評価

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 値部分を拡大したものを図 6 に示す。両図では、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、取替えて

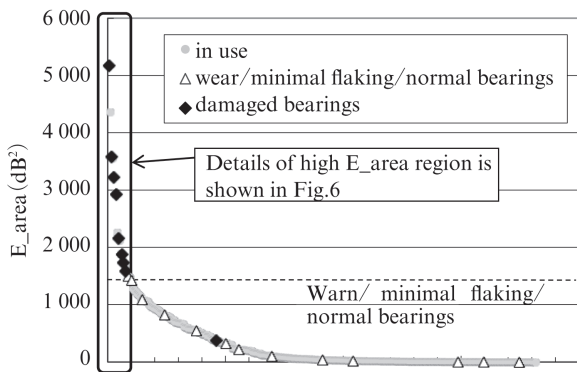


図 5 E_area 測定結果
Fig. 5 Measurement result of E_area

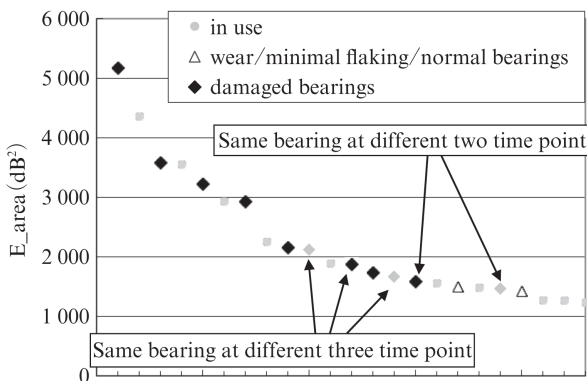


図 6 高 E_area 部分の測定結果
Fig. 6 Measurement result of high E_area

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、同一箇所を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 がおおむね 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。また、E_area が数十と低い箇所では、軸受に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。これより、軸回転速度が遅くとも損傷面と転動体の接触や剥離の進展等により AE が発生したことを、E_area の値で確認できると言える。

また、図 6 に同じ軸受について複数回同様の測定を実施した結果を示したが、E_area の値自体に大きな変動は見られず、再現性があることが確認できた。さらに軌道面の摩耗等により、徐々に軸受の状態が悪化していくことが、E_area の値が上昇することで確認できた。

3.3 実設備による軸受取替前後の AE 測定結果と軸受状態の比較事例

軸受取替前後の AE 測定結果と軸受の状態について、比較事例を以下に示す。

図 7 は、測定時軸回転速度は 50 rpm、取替前の E_area が 2 931 の AE 波形、振幅分布、FFT 結果データである。取替前に得られた E_area は 3 000 程度と非常に高かったが、取替後の E_area は 0 に低減することが確認できた。写真 1 は取り外した軸受を確認した結果であり、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剥離

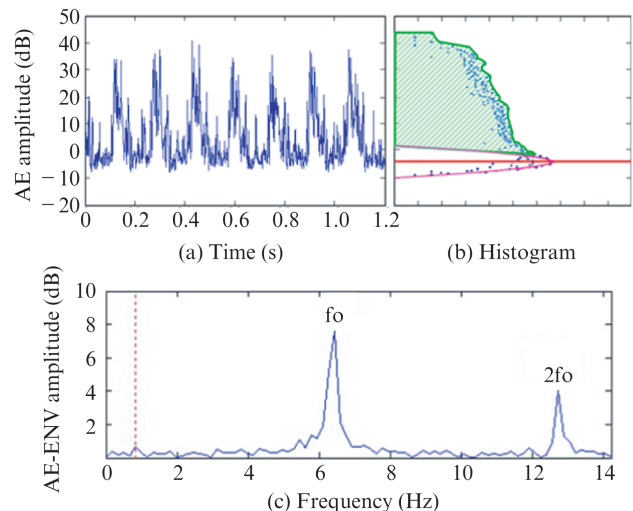


図 7 軸受損傷例 1 測定データ
(a) AE 波形 (b) 振幅分布 (c) FFT

Fig. 7 Bearing damage example 1 Measurement data
(a) AE waveform (b) Amplitude distribution (c) FFT



写真 1 軸受損傷例 1

Photo 1 Bearing damage example 1

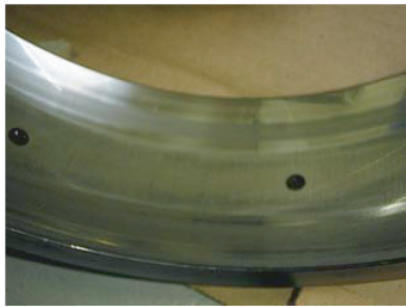


写真 2 軸受損傷例 2 (65.7 rpm/E_area=1 503)

Photo 2 Bearing damage example 2 (65.7 rpm/E_area = 1 503)

損傷が見られた。

写真 2 は、測定時軸回転速度が 65.7 rpm、取替前の E_area は 1 503 の軸受写真である。取替後の E_area は 8 であった。

取り外した軸受を確認した結果、外輪軌道面、内輪軌道面、転動体軌道面に顕著な摩耗痕が見られたが、剥離等の損傷は認められず、損傷状況としては図 7 と比べると程度は軽く、E_area 値の傾向と良く一致することがわかった。

4. 適用事例

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には、当初グリス分析を採用していた。図 8 に軸受起因による設備停止時間および E_area の推移を示す。軸受トラブルによる設備停止が定期的に発生していることがわかる。2007 年に AE 診断器を導入してからは徐々にトラブルが減少しており、AE 診断器の導入が低速回転軸受のトラブル抑止に効果があることがわかる。また、本稿で述べた診断器に、更に E_area のパラメータ感度調整など加えた低速回転軸受診断器 (MK-560) を JFE アドバンテックが市販しており、2011 年からこちらも導入した。E_area 値の大きさにより危険 (500 以上)、注意 (100~499)、正常 (100 未満) と判断基準を定め、それぞれの判定に応じて対処している。

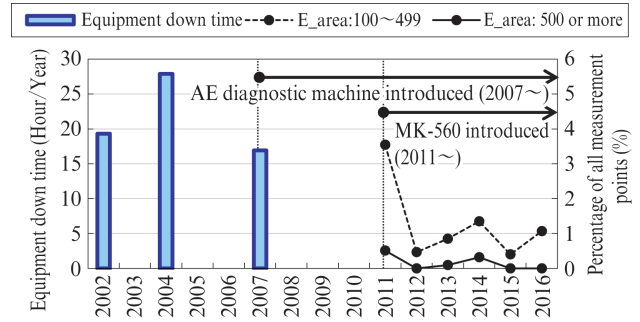


図 8 設備停止時間および E_area 推移

Fig. 8 Equipment down time and E_area transition

これらの機器の導入により、設備停止時間は徐々に減少し、異常割合も年々改善されている。また、MK-560 の導入以降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。今後も診断を継続していくとともに、原料搬送系のベルトコンベアの駆動系にも適用し、対象設備の拡大を図る計画である。

5. おわりに

低速回転軸受の状態監視のため、微視的な損傷や摺動・摩耗に感度が高く、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、実設備でその有効性を検証することで以下の結論を得た。

- (1) E_area の測定結果と取り外し品の調査結果から、E_area により低速回転軸受の異常状態を検知できることがわかった。
- (2) E_area を用いた診断器を定期的を用いることで、トラブルを未然に防止することができた。

参考文献

- 1) 小田将広, 吉良耕一, 岡本謙. 低速回転軸受が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. 2012, p. 69-72.
- 2) 高田基樹, 吉良耕一. 低速軸受の AE 計測による損傷診断. トライボロジー研究会第 28 回講演会 (前刷). 2017, p. 41-44.
- 3) 吉良耕一, 高田基樹. 低速回転軸受の AE 計測による損傷診断. bmt(ベアリング&モーションテック) 2017 年 7 月号. 2017, p. 23-25.



高田 基樹



小田 将広