

## Development of Diagnosis for Roller Bearings by Acoustic Emission



井上 紀明  
Noriaki Inoue  
水島製鉄所 設備部設  
備技術室 主査(課長  
補)



西本 重人  
Shigeto Nishimoto  
光洋精工(株) 第二研  
究部



藤本 芳樹  
Yoshiki Fujimoto  
光洋精工(株) 第二研  
究部 係長



原田 俊二  
Syunji Harada  
川鉄アドバンテック  
(株) 技術部 主査(掛  
長)

### 1 緒 言

厚板圧延機のバックアップロール(BUR)軸受には、一般にすべり軸受が用いられているが、圧延板厚の精度向上を目的としてころがり軸受の適用を試みた。この場合、ころがり軸受の転走面にはく離が発生すると板厚不良が発生するので、はく離の検出が可能なころがり軸受の診断技術の開発が不可欠である。

一般的に、ころがり軸受の異常検出には振動法が適用されるが、この方法でははく離発生の事後検出となり、軸受の故障監視には有用であるが、故障予知には不適當といえる。一方、アコースティック・エミッション(AE)法を用いればはく離発生時の検出が可能で、軸受の異常を予知して板厚不良を防止できると考えられた。そこで光洋精工株式会社、川鉄アドバンテック株式会社および川崎製鉄の3社の共同研究により、AE法を用いた診断技術の開発を進めた。

本報告では、ころがり軸受の内輪はく離、外輪はく離、ころはく離およびつば当りを発生させる実験にともなうAE特性の解析を行

### 要旨

ころがり軸受の異常予知を目的として、アコースティック・エミッション(AE)法による診断技術の開発を行った。まず基礎実験で、(1) AE ははく離の進展時に発生すること、(2) AE はころがり軸受の内輪、外輪およびころのはく離発生位置に応じて、軸受の回転数に依存する特性周期に一致すること、(3) つば当り発生時のAE ははく離発生時のAE よりも振幅は大きく持続時間が長いことなどを確認した。

これらの知見をもとに、ころがり軸受の異常の有無と異常現象を判別できる診断装置を開発し、水島製鉄所の厚板圧延機用バックアップロールころがり軸受に適用した。

### Synopsis:

A diagnostic technique through monitoring acoustic emission (AE) was developed for the purpose of predicting problems associated with roller bearings.

In the course of the experiments for this developmental work, it has been found and confirmed that (1) flaking produces AE while it is in progress, (2) AE, as an intermittent signal, has a bearing-rotational-speed-dependent characteristic period according to the position of flaking such as at the inner race, outer race or roller, and (3) AE produced by axial hits of the rollers against the rib is greater in amplitude and longer in duration than AE caused by flaking.

Based on the above findings, a diagnostic system capable of detecting bearing problems and analyzing such problems was developed. This system is currently applied to the roller bearings, which were adopted on the backup rolls for the plate mill of the Mizushima Works to improve the rolling thickness accuracy.

い、その結果に基づき開発したころがり軸受の診断技術について述べる。

### 2 診断の対象と障害となるノイズ

ころがり軸受の主な異常現象として、内輪はく離、外輪はく離、ころはく離およびつば当りなどが挙げられるので、これらの現象を早期に検出できることを開発の目標とした。とくに、つば当りはミスアライメントや過大なスラスト荷重の作用により生じる現象で、つば当り面は潤滑不良を伴い加速度的にはく離が進展して軸受損傷となり軸受不転などの故障の原因となる。したがって、つば当りについても、その発生時点で検出できることが必要である。

一方、ころがり軸受のころは保持器で保持されているが、軸水平で使用される軸受においては、下側に位置したころが軸受の回転により上側に移動し、このときにころ落ち現象が発生する。このこ

\* 昭和62年9月25日原稿受付

ろ落ちは大型軸受で顕著に現れ、軸受の回転数に応じて周期的に発生する音響であるが、軸受異常ではなく診断対象外のノイズとして扱う必要がある。

### 3 実験計画

Fig. 1 に示す実験装置で、各種のはく離発生と使用条件のもとで実験を行い、AE 信号を解析して AE 特性を把握することにした。なお、実験に用いるはく離軸受は、転走面または転動体にロックウェル硬度計で圧こんをつけて、はく離を発生させやすくしたものを用いた。

#### 3.1 小型軸受による実験

小型円筒ころ軸受 (NU 206) を用いて、はく離と AE 特性の関係について、はく離部位の単独と複合の差異、はく離の大きさ、回転数、荷重などの影響を調べた。この実験計画を Table 1 および 2 に示し、つば当りの早期検出に関する実験計画を Table 3 に示す。なお、表中の○印番号は実験番号を指す。

#### 3.2 中型軸受による実験

軸受寸法と AE 特性やころ落ち時の AE の特性を明らかにするために、Table 4 に示す中型軸受 (24 FC 18105) による実験を計画した。

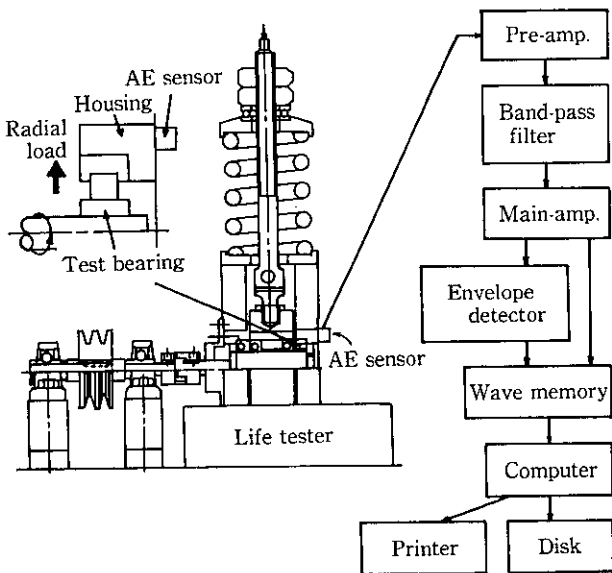


Fig. 1 Equipment for bearing test

Table 1 Test conditions\*1 for investigation of AE phenomenon on the NU206 bearing\*2 in various rolling conditions

Flaking on inner ring	Load (kgf)	1 308 (0.6 C)		218 (0.1 C)*3	
		2 400	1 000	2 400	1 000
Large		①	②	③	④
Small		⑤	⑥	⑦	⑧

\*1 ①~⑧: Test number  
\*2 Bore diameter:  $\phi 30$  mm  
\*3 C: Load rating

Table 2 Test conditions for investigation of AE phenomenon in each flaking element of NU206 bearing\*1

Test number	Load (kgf)	Revolution (rpm)	Flaking element			
			Inner ring	Roller	Outer ring	
①	1 308 (0.6C)*2	2 400	○			
②				○		
⑩						○
⑪			○	○		
⑫				○	○	

\*1 Bore diameter:  $\phi 30$  mm  
\*2 C: Load rating

Table 3 Test conditions for investigation of the rib contact effect on AE phenomenon

Test number	Load (kgf)	Revolution (rpm)
⑬	218 (0.1 C)	2 400

Note (1) Bearing: NU206 (Bore diameter 30 mm $\phi$ )  
(2) C: Load rating

Table 4 Test conditions for investigation of AE phenomenon of medium size bearing\*1

Test number	Load (kgf)	Revolution (rpm)
⑭	4 000 (0.1 C)*2	1 000
⑮	0	8

\*1 24FC18105 (Bore diameter:  $\phi 120$  mm)  
\*2 C: Load rating

#### 3.3 実験回転数と軸受特性周波数

はく離発生時の AE 特性把握実験では実験効率を上げるために、高回転数で実験を計画した。しかし、一般に使用される軸受は低回転数の場合も多い。また、開発した技術を厚板圧延機用 BUR 軸受に適用することを計画しているが、BUR 軸受は最高 60 rpm の低回転数である。このため、BUR 軸受の特性周波数に相当する低回転数でも実験を行い、はく離が AE 法で検出できることの検証が必要である。

はく離発生時の AE は、軸受の特性周波数に応じて発生するという実験事実に基づき<sup>1-4)</sup>、この特性周波数に着目した。内輪回転の場合の特性周波数の計算式を次に示す。

$$\text{内輪回転周波数} : f_r = \frac{N}{60}$$

$$\text{内輪転動体通過周波数} : f_i = \frac{Zf_r}{2} \left( 1 + \frac{D_a}{d_m} \cos \alpha \right)$$

$$\text{外輪転動体通過周波数} : f_o = \frac{Zf_r}{2} \left( 1 - \frac{D_a}{d_m} \cos \alpha \right)$$

$$\text{転動体自転周波数} : f_b = \frac{d_m \cdot f_r}{2D_a} \left( 1 - \frac{D_a^2}{d_m^2} \cos^2 \alpha \right)$$

$$\text{転動体公転周波数} : f_c = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{D_a}{d_m} \cos \alpha \right) = \frac{f_o}{Z}$$

ここで、 $N$ : 内輪回転数  
 $Z$ : 転動体個数

Table 5 Characteristic frequency in test bearing and in actual rolling mill BUR bearing

	Test bearing		Actual bearing	
	NU206	24FC18105	296FC185110	
Number of roller $Z$	13	24	53	
Contact angle $\alpha$ ( $^\circ$ )	0	0	0	
Roller diameter $D_a$ (mm)	7.5	15	95	
Pitch circle diameter $d_m$ (mm)	46	150	1 669	
Revolution $N$ (rpm)	1 000	1 000	22 (Average)	
Characteristic frequency (Hz)	$f_r$	16.7	16.7	0.37
	$f_l$	126	220	28.0
	$f_o$	90.7	180	25.0
	$f_b$	49.8	82.5	8.80
	$f_s$	6.98	7.50	0.47

Table 6 Revolution of test bearing for adjusting the characteristic frequency of actual rolling mill

Test number	Test bearing	Revolution (rpm)
⑯	NU206	200
⑰	24FC18105	120

$\alpha$ : 接触角  
 $D_a$ : 転動体直径  
 $d_m$ : 軸受のピッチ円径

実験軸受と厚板 BUR 軸受の各々の諸元を上式に代入して求めた特性周波数を Table 5 に示すが、両者の特性周波数は大幅に異なる。このため、厚板 BUR 軸受の特性周波数に一致させた実験も必要と考え、Table 6 に示すように低回転数実験を計画した。

### 4 実験結果

#### 4.1 はく離の発生と AE

Fig. 2 に、はく離が単独で発生した場合の AE 信号を示す。はく離が発生した場合は突発形 AE が認められ、その周期は軸受の特性周波数に一致している。この周期性の一致は、はく離部位が軸受の負荷圏を通過するときに圧縮応力を受けた結果であり、はく離のクラック進展により AE が発生しているといえる。次に軸受の使用条件である荷重と回転数の影響については、AE 振幅は荷重の増大とともに大きくなるが、回転数の増加ではたいして大きくなりません。これより異常検出の信頼性を高めるには、軸受荷重が負荷されているときの AE 信号が有効であるといえる。

一方、はく離部位が内輪とところあるいは外輪とところのように複合した場合は、Fig. 3 に示すように単独はく離の AE 信号が重畳する。

#### 4.2 つば当りおよびころ落ちの発生と AE

Fig. 4 につば当りが発生した場合の AE 信号を、はく離発生時の AE 信号と比較して示す。つば当り発生時の AE は、はく離発生時の AE に比べて振幅が大きく連続形の信号である。また、つば当り発生時の AE 信号の時間軸を拡大したものを Fig. 5 に示すが、AE 振幅は内輪回転周期に同期して増減している。つば当り時の AE は、軸受外輪のつばとところ端面が金属接触して損傷することにより発生

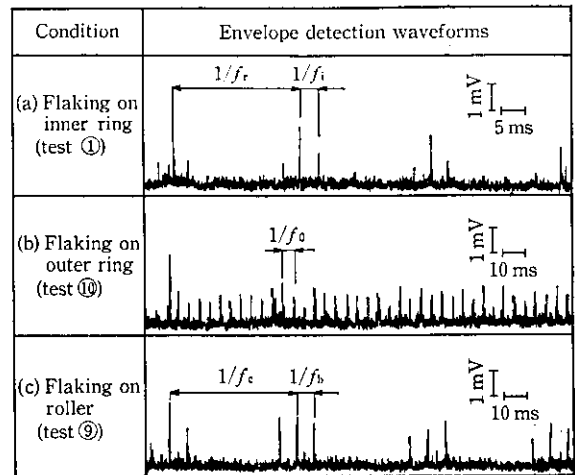


Fig. 2 AE detection after flaking

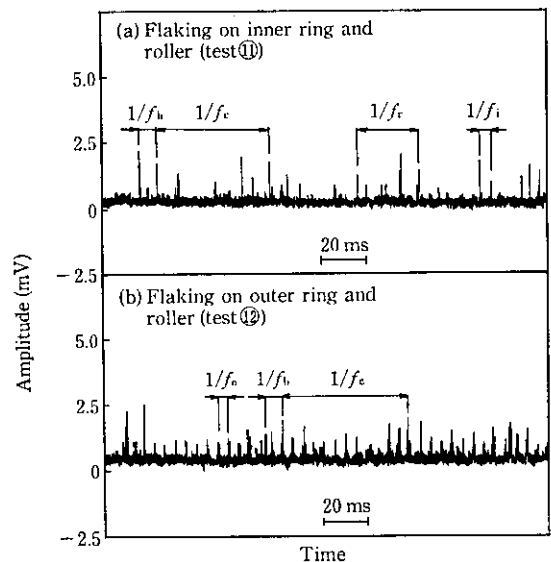


Fig. 3 AE detection after flaking on plural elements

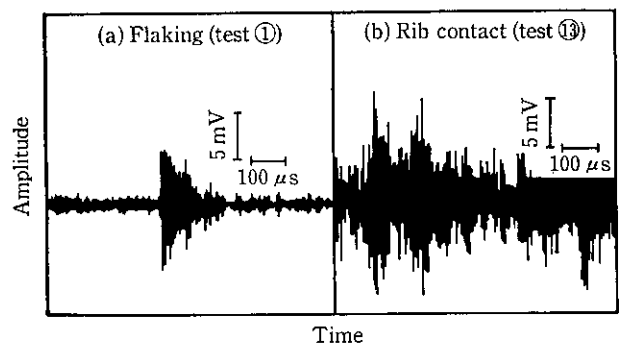


Fig. 4 AE detection after flaking and on rib contact

すると考えられ、つば当りの検出にも AE が有効である。

一方、ころ落ちが発生する低回転数で AE 信号を解析した結果、軸受診断の観点からは有害な AE の発生は観察されていない。

#### 4.3 異常時の AE の周波数分析

はく離発生時とつば当り発生時の AE の周波数分析を、Fig. 6 に示す。はく離発生時は 200~500 kHz の周波数成分が多く、金属材料の破壊時に観察される周波数成分<sup>5)</sup>とよく一致している。一方、

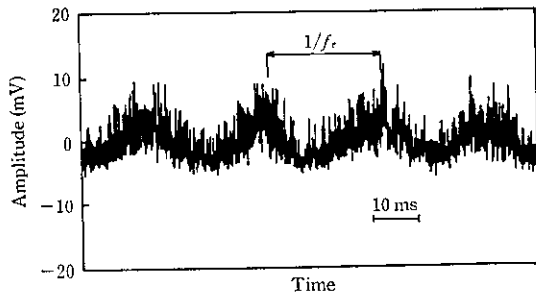


Fig. 5 AE envelope detection waveforms on rib contact (test ⑬)

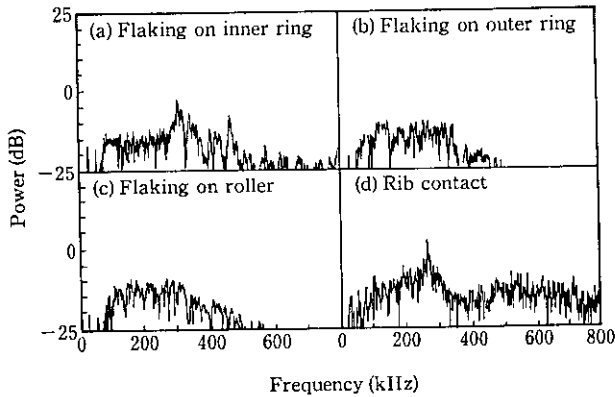


Fig. 6 Power spectrums of AE after flaking and on rib contact

つば当り発生時は、さらに高周波の 500~800 kHz 領域にも成分をもっている。

このため、はく離検出には 200~500 kHz のバンドパスフィルタ (BPF) の通過信号で、つば当り検出には 600 kHz のハイパスフィルタ (HPF) の通過信号で信号処理をすれば、両者の判別が明確になる。

### 5 実用化のためのフィールド実験

軸受異常検出のための診断装置の厚板圧延機用 BUR 軸受への適用性を調べるために、厚板圧延機で圧延中に発生する AE を測定した。この結果、板のかみ込と板抜け時の衝撃により大振幅の AE が発生しているが、圧延中の AE は立上りがゆるやかで振幅も比較的小さく周期性は認められない。すなわち、板のかみ込と板抜け時には、軸受異常検出の観点からは障害となる AE が発生するが、圧延中には障害となる AE が発生していないといえる。

## 6 異常判別のアルゴリズム

### 6.1 はく離検出のアルゴリズム

- (1) 診断の対象となる軸受の回転数の変化は、はく離による AE の発生周期に影響するため回転数補正を行う。
- (2) 軸受荷重が作用した時点と荷重が除去された瞬間の AE は、診断に際して障害となるので除外する。
- (3) はく離による AE は発生の有無が不規則であり、軸受荷重の作用時間が短い場合もあるので、異常判別は数回の荷重作用時における AE の発生周期の頻度で行う。

以上の基本的な考え方に基づき開発したはく離検出のアルゴリズムを、Fig. 7 に示す。まず、フィルタを 200~500 kHz の BPF とし、

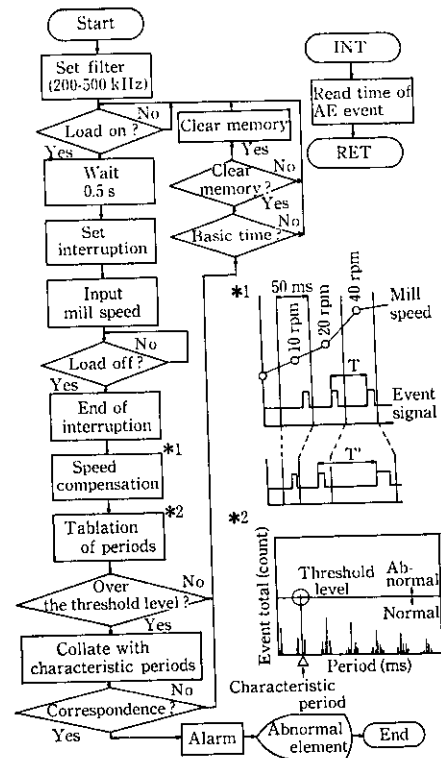


Fig. 7 Flaking detection algorithm

はく離からの AE だけを通過させる。その後、荷重作用時の有害な AE の影響を回避した後に、割り込み処理により AE の発生周期を測定して記憶する。同時に一定間隔で軸受回転数を読み込み記憶する。これらを用いて荷重除去後、AE 発生周期を図中 \*1 に示すように、基準回転数での周期に補正する。補正された AE 発生周期は、図中 \*2 に示すように累積され、しきい値を超える数の AE が発生した場合には、それぞれの特性周期との対照を行いはく離部位を判別する。もし、しきい値を超える AE の発生が存在しない場合は、周期の累積を規定数繰り返して異常の判別動作を継続する。

### 6.2 つば当り検出のアルゴリズム

つば当り検出のアルゴリズムを Fig. 8 に示す。基本的にはく離検出の場合と同様であるので、相違する部分のみを説明する。まず、つば当りとはく離を弁別するために、つば当りの特徴である高周波成分を利用し、600 kHz の HPF 信号を用いる。さらに、つば当りによる AE ははく離時の AE に比べて持続時間が長いので、5 ms をしきい値として弁別する。以上の弁別後に、はく離検出と同様の信号処理で、異常が診断される。

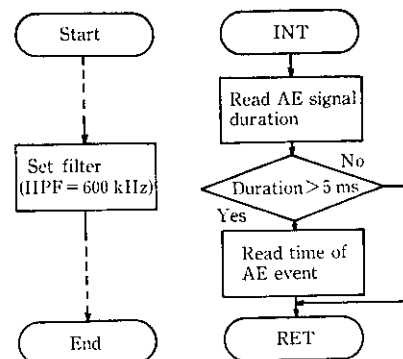


Fig. 8 Rib contact detection algorithm

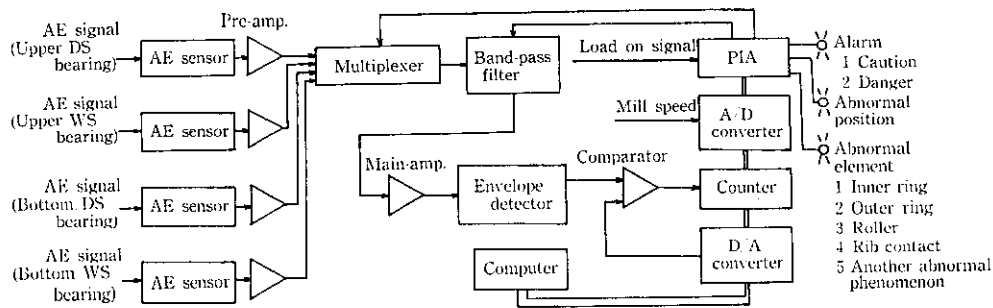


Fig. 9 Bearing abnormal phenomenon detective system

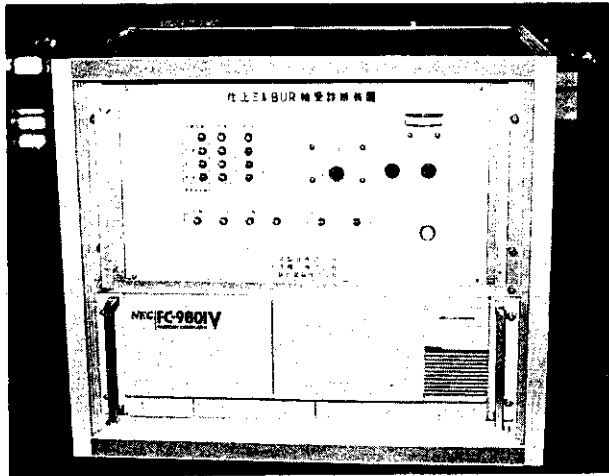


Photo 1 Front view of bearing abnormal phenomenon detective system

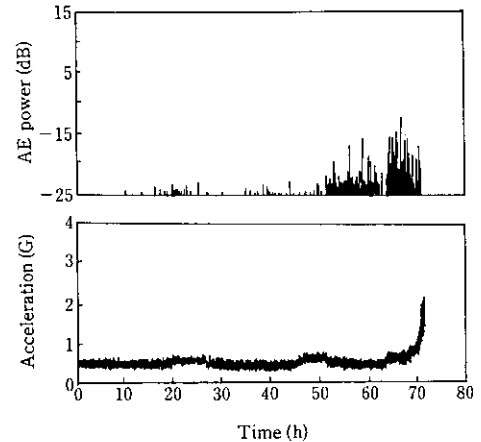


Fig. 10 Amplitude of AE and acceleration of vibration

## 7 軸受異常診断装置の構成

前章で述べた異常検出のアルゴリズムを基に開発した軸受診断装置のブロック図および外観を Fig. 9 および Photo 1 に示す。本装置は、フィルタで軸受異常時の AE を弁別し、包絡線検波回路と比較器によりイベント信号を出力する。出力された信号は、コンピュータを含む処理回路にてソフトウェアにより異常判別を行うように構成されている。

なお、本装置には軸受異常の処理機能の他に、通常は発生しないような多量の AE が発生した場合、軸受以外の異常として警報を発する機能を持ち、軸受本体のみならず軸受周りの診断も可能である。

## 8 AE 法と振動法の検出可能時期の比較

単列深みぞ玉軸受 (6306) を用い回転数 2 250 rpm, 荷重 0.6 C (C: 動定格荷重) の条件で連続負荷運転を行い、AE と振動を同時に測定した。Fig. 10 に示すように、振動加速度の上昇開始は実験開始から 68.5 h 後であるのに対し、AE のそれは 53 h 後である。早期検出の観点で、AE 法の方が有効である。

## 9 結 言

ころがり軸受異常の早期検出を目的として、AE 法による診断技術の開発を進め、次の結果を得た。

- (1) はく離による AE は、はく離部位に応じた特性周期で発生し、その振幅は荷重の増加にともない大きくなる。

- (2) つば当りによる AE は、振幅が大きく持続時間が長い。また、その発生周期は内輪回転周期に一致している。
- (3) はく離の AE は 200~500 kHz に特徴をもち、つば当りによる AE は 500~800 kHz にも特徴をもつ。
- (4) 実機圧延機では、板のかみ込と板抜け時に、異常検出の観点から障害となる振幅の大きな AE が発生しているが、圧延中は障害となる AE は発生していない。

以上の結果をもとに、軸受異常検出アルゴリズムの開発を行い、軸受異常の有無のみならず損傷現象の判別ができる診断装置を開発し、厚板圧延機用 BUR 軸受に適用した。

本開発の基礎的実験とフィールド実験から得た知見に基づき、今回開発のソフトウェアを一部修正することにより、圧延機以外の産業機械用軸受の診断に対しても十分に適用が可能である。

従来、軸受の異常診断は主として振動法を用いた軸受の故障監視であったが、本診断装置は、はく離発生の初期にその異常の検出が可能であり、ころがり軸受が使用されている設備で製造される製品の品質異常の予知ところがり軸受の故障予知の技術として十分に活用できるものである。

## 参 考 文 献

- 1) 五十嵐昭男: 潤滑, 32 (1987) 5, 317-322
- 2) 吉岡武雄: 潤滑, 31 (1986) 5, 291-294
- 3) 藤田良樹, 井上義幸, 石川秀幸: Koyo Engr. J., (1984) 125, 18-23
- 4) 吉岡武雄, 藤原孝誌: 日本潤滑学会北三大会研究発表会予稿集, (1984)
- 5) Imaeda, H.: "Acoustic Emission Characteristics During Tensile Tests of Various Metals with Several Types of Crystal Structures", 3rd AE symp., Tokyo, (1976), 492-512