
圧延機用すべり軸受の AE による損傷診断技術

Diagnosis of Backup Roll Journals for Rolling Mill by Acoustic Emission

井上 紀明(Noriaki Inoue) 尾崎 研吾(Kengo Ozaki) 佐藤 弑也(Ichiya Sato) 米山
隆雄(Takao Yoneyama) 掛札 優(Masaru Kakehuda) 昼岡 修一(Syuichi Hiruoka)

要旨：

アコースティックエミッション(AE)法による圧延機用すべり軸受の損傷診断技術の開発に関し、実機圧延機を用いた人為的損傷実験とその信号解析を基にして開発した診断システムについてまとめた。軸受損傷の主要因であるラジアル面損傷時には、連続型の AE の上に突発型 AE が重畳された信号が発生し、スラスト当り損傷時には持続時間の長い AE 信号が発生する。また、圧延中には種々のノイズが発生するため、それらとの判別が必要である。基本となる診断処理は、包絡線検波処理後のフィルタ処理と AE 持続時間判断回路によって行われ、損傷現象の種類毎にアラームが点灯するようになっている。

Synopsis：

This paper reports an automatic damage diagnosis system for journal bearings of the rolling mill. The system was developed through the tests and signal analysis of artificial damages, using an actual mill. For a radial surface damage, burst type acoustic emission (AE) signals are observed, overlapping continuous type AE signals. For damage by thrust movement, AE signal appears continuously. The system also automatically distinguishes AE signals from miscellaneous noises caused by rolling. The basic diagnosis is carried out by filtering after envelope handling and measuring of the duration time of AE signals. The system tells the kind of damage by lighting up a corresponding alarm lamp.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Diagnosis of Backup Roll Journals for Rolling Mill by Acoustic Emission



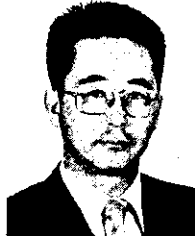
井上 紀明
Noriaki Inoue

水島製鉄所 設備部設
備技術室 主査(掛長)



尾崎 研吾
Kengo Ozaki

水島製鉄所 電気計装
部電気計装技術室



佐藤 式也
Ichiya Sato

(株)日立製作所 日立
研究所第9部 主任研
究員



米山 隆雄
Takao Yoneyama
(株)日立製作所 日立
研究所第9部



掛札 優
Masaru Kakehuda
日立エンジニアリング
(株) 応用システム部
主任技師



屋岡 修一
Syuichi Hiruoka
日立エンジニアリング
(株) 応用システム部
技師

要旨

アコースティックエミッション(AE)法による圧延機用すべり軸受の損傷診断技術の開発に関し、実機圧延機を用いた人為的損傷実験とその信号解析を基にして開発した診断システムについてまとめた。

軸受損傷の主要因であるラジアル面損傷時には、連続型 AE の上に突発型 AE が重畳された信号が発生し、スラスト当り損傷時には持続時間の長い AE 信号が発生する。また、圧延中には種々のノイズが発生するため、それらとの判別が必要である。基本となる診断処理は、包絡線検波処理後のフィルタ処理と AE 持続時間判断回路によって行われ、損傷現象の種類毎にアラームが点灯するようになっている。

Synopsis:

This paper reports an automatic damage diagnosis system for journal bearings of the rolling mill. The system was developed through the tests and signal analysis of artificial damages, using an actual mill. For a radial surface damage, burst type acoustic emission (AE) signals are observed, overlapping continuous type AE signals.

For damage by thrust movement, AE signal appears continuously. The system also automatically distinguishes AE signals from miscellaneous noises caused by rolling. The basic diagnosis is carried out by filtering after envelope handling and measuring of the duration time of AE signals. The system tells the kind of damage by lighting up a corresponding alarm lamp.

1 緒 言

熱間圧延機のバックアップロールには、すべり軸受が用いられている。このすべり軸受に異常が生じると生産機会の損失となる。現在のすべり軸受の損傷監視は、潤滑排油温度監視で行っているが、圧延ラインの稼働率向上と予防保全の観点から、早期検出と正確性に優れた軸受診断方法の開発が望まれていた。

すべり軸受の損傷診断には、排油温度監視、軸受メタル温度監視、振動測定法などが挙げられるが、これらはいずれも軸受損傷発生後に検知し得るものなので事後診断に終わってしまう。これに比べてアコースティック・エミッション(AE: acoustic emission)法は、潤滑油膜が切れて金属接触を起こし軸受異常が発生した時点で検出可能である。このため、AE法は軸受損傷の予知診断になり得ると考えられる。

AE法によるすべり軸受診断としては、株式会社日立製作所が蒸気タービン用すべり軸受診断法を開発¹⁾し効果を上げている。ところでタービンと圧延機では、設備仕様、軸受損傷状態、環境ノイズ

などが異なるため、圧延機用すべり軸受を AE 法で診断するには、現象解明の検討から信号処理技術の開発が必要である。そこで、株式会社日立製作所、日立エンジニアリング株式会社および川崎製鉄の共同研究体制により、AE法を用いた診断技術の開発を進めてきた。

本報告では、実機圧延機を用いた人為的軸受損傷実験、圧延中のフィールドデータの解析をもとに開発した異常現象の判別が可能な、圧延機用すべり軸受損傷診断技術について述べる。

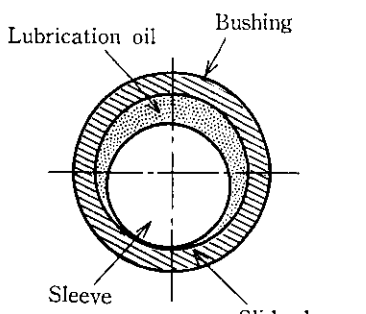
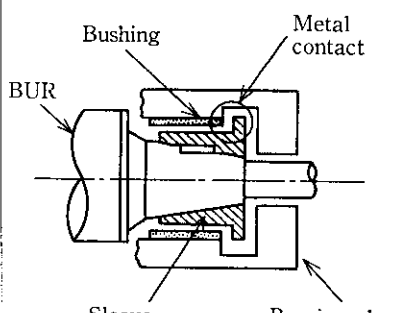
2 診断の対象となる軸受異常

Fig. 1 に圧延機用すべり軸受(モーゴイル軸受)の構造を示す。バックアップロール(BUR)のドライブ側軸受部(DR側軸受)とオペレーション側軸受部(OP側軸受)の構造は異なっており、DR側軸受にはラジアル方向の圧延荷重を支えるすべり軸受のほか、スラスト方向の荷重を支えるためのスラスト軸受(チーバころ軸受)が設けられている。

圧延中に、潤滑油系統の故障、軸受荷重の過大および潤滑油温度

* 昭和60年7月17日原稿受付

Table 1 Classification of slide bearing damages

Cause of damage	Bearing damage phenomena
Radial plane damage • Excessive load on bearing • Increase in oil temperature	• Wearing of bushing face 
Thrust batting • Mechanical mis-setting	• Metallic contact between sleeve side and bushing side 

の上昇などがあると、軸受のブッシングとスリーブが摺動損傷を起こす。これをラジアル面損傷と呼ぶ。また、機械的セッティングミスがあるとスリーブ側面とブッシング側面が金属接触を起こす。この現象をスラスト当たりと呼ぶ。このスラスト当たり現象は Fig. 1 に示した OP 側軸受のみで発生し、DR 側軸受には前述のスラスト軸受が設けられているため、その発生はない。各現象の発生メカニズムをまとめると **Table 1** のようになる。

本報告では、上に述べたラジアル面損傷とスラスト当たりの診断

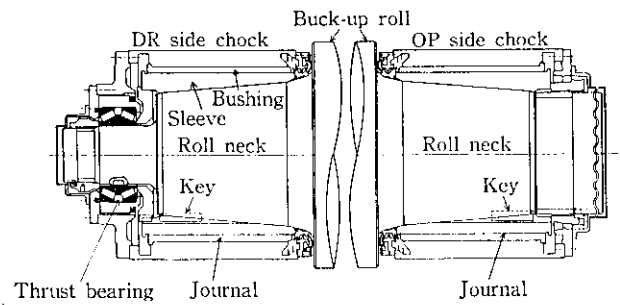


Fig. 1 Morgoil bearings

を対象としており、軸受部に設置した AE センサにて各現象発生時の AE 信号を検出し、その信号を処理することにより軸受損傷現象を早期に診断して、軸受異常の発生や損傷事故を未然に防止する技術の開発を目指している。

3 軸受損傷診断実験

3.1 ラジアル面損傷診断

3.1.1 診断実験の方法

今回の実験対象は薄板用熱間圧延機仕上ミル群の中間にある F4 スタンドで、**Fig. 2** のブロック図に示すように、ワークロール (WR) 間に圧延材が無い状態で、実圧延と同等のロール回転および実圧延荷重と同等の負荷を加え、実際の圧延状態を模擬して実験を行った。

軸受損傷を発生させる手段としては、実験対象軸受 (OP 側軸受) への潤滑油量を通常油量から徐々に減らし、油切れによる軸受損傷を発生させることにした。AE センサは上 BUR の DR 側と OP 側の両側の軸受チョック部に設置し、プリアンプ、メインアンプで増幅した後に実効値回路に通し、その出力をペンレコーダにて監視するとともに、メインアンプより出力される信号をデータレコーダに収録して、その後に波形の解析や信号処理回路の開発に用いた。

なお、実験対象としたすべり軸受のブッシングには、**Fig. 3** に示したようにサーモカップルを合計 6 点設置してブッシングの温度を監視し、AE 計測法との対応を図りながら実験を進めた。

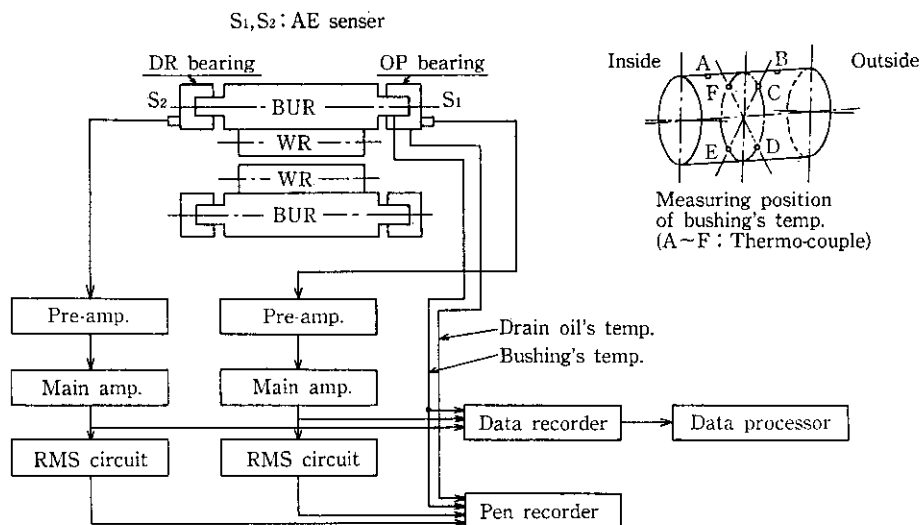


Fig. 2 Equipment for bearing damage diagnosis testing

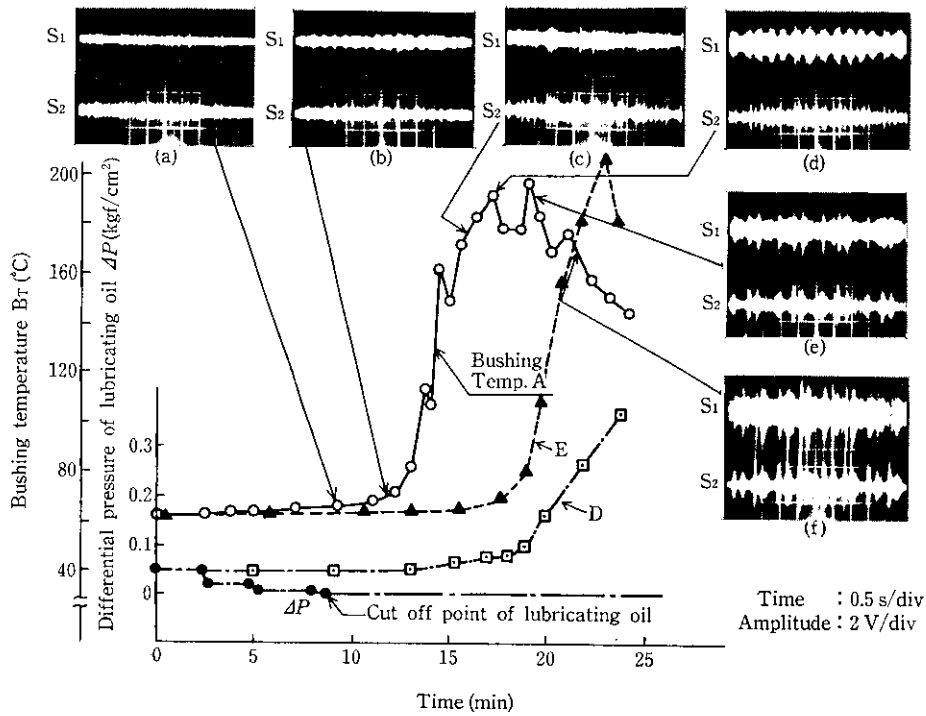


Fig. 3 Results of radial plane damage monitoring test with slide bearing

3.1.2 診断実験の結果と検討

Fig. 3 に軸受損傷によって発生した AE 信号波形とブッシング温度との関係を示す。AE 信号波形 (a~f) の S_1 は損傷対象軸受である OP 側に設置した AE センサ出力波形, S_2 は DR 側軸受に設置した AE センサ出力波形である。実験開始後 10 分以内では Fig. 3 の (a) に示されるようにまだ損傷は発生しておらず、回転に伴う一定振幅の高周波ノイズが見られるにすぎない。ここで、 S_1 , S_2 ともにシャープな突発型の AE 信号が見られるが、これは DR 側軸受部で発生したノイズを受信しているものである。次に実験開始後 12 分に至ると Fig. 3 の (b) に見られるように、 S_1 側波形に信号振幅の増加がわずかに現れるようになる。この時点ではブッシング温度 (A 点) も上昇し始めているので、油膜切れによってラジアル面に軽い金属接触現象が起り始めたものと推察される。さらに金属接触が進むとブッシング温度も急激に上昇し始め、Fig. 3 の (c) および (d) に見られるように S_1 側信号の振幅が増加するようになる。なお (d) では、振幅の大きな連続型信号に立上りの緩やかな信号が重畳されており、しかも周期性をもって発生しているのが見られる。この時点では、ブッシング温度との関係からも明らかに損傷が始まったものと思われる。さらに損傷が進み、実験開始後 19 分以降になると A 点のブッシング温度は下降し始め、C 点および D 点のブッシング温度が上昇してくるようになる。ブッシング内張りの金属の溶融温度は 240°C 前後であり、この時点で A 点のブッシング温度は 200°C 以上に達しているの、ブッシング温度を測定した A 点近傍のブッシング内張り金属は溶融し始め、D 点近傍まで温度を上げたものと思われる。この時に発生した AE 信号波形が Fig. 3 の (e) および (f) であり、連続型信号に突発型信号が加わる。損傷が拡大するに従って突発型信号の発生数も多くなり、その振幅も増大しているのがわかる。なお、本実験では潤滑油を遮断したため、排油温度の測定は困難であった。

次に、前述した結果よりブッシング損傷のメカニズムと AE 波形の関係について考察する。ラジアル面損傷の発生初期は、ブッシン

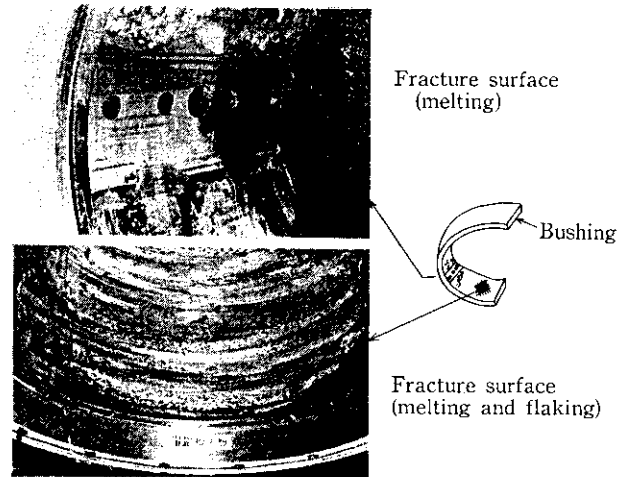


Photo 1 Bushing surface after radial plane damage testing

グとスリーブ間の潤滑油欠損により、極く軽微な金属接触現象を起こす。この金属接触によるブッシングの局部的塑性変形により、Fig. 3 の (c) のような AE 波形が発生すると考えられる。次に損傷の進展により金属接触領域が徐々に拡大するため、Fig. 3 の (d) の波形に見られるように、連続型信号の振幅が徐々に増大する。さらに損傷が進展すると損傷した部分が変形やはく離を起こすため、Fig. 3 の (e) に見られるように突発型 AE 信号が発生するようになり、変形やはく離の領域が増大し、ブッシング内張り金属が溶融する過程において (f) に見られるように突発型信号の発生数と振幅が増大するものと考えられる。したがって実機での軸受監視にあたっては、少なくとも突発型信号が発生する以前に、潤滑給油温度、軸受回転数、圧延荷重の低下などの対策を講じる必要がある。

Photo 1 に実験後の軸受ブッシング内面を示したが、ブッシングが損傷され、内張り金属が溶け出している様子がわかる。

以上に述べたように、軸受損傷の初期段階より AE 信号が発生し、しかも損傷の状態により AE 信号の発生形態も変化するため、軸受損傷の初期と損傷状態の診断に AE 計測法が有効な手段になり得ることがわかった。

3.2 スラスト当たり診断

3.2.1 診断実験の方法

Fig. 4 にスラスト当たりの診断実験の方法を示す。OP 側軸受チャックと DR 側軸受チャックの軸方向軸受間隔を保つために設置されているタイバー部にターンバックルを設け、プッシングとスリーブ間のギャップ ΔG を徐々に狭め、Fig. 4 の A 部でスラスト当たり現象を発生させた。なお、この実験における潤滑油量は、通常の運転時と同じ状態にした。また、AE 信号とプッシング温度のデータ採取は、ラジアル面損傷実験と同様に Fig. 3 に示すブロック図で行った。

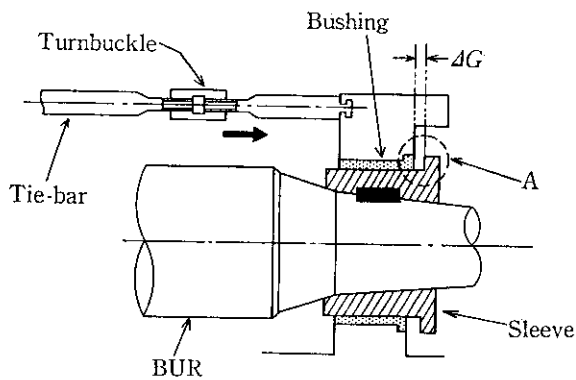


Fig. 4 Experimental method of thrust batting diagnosis

3.2.2 診断実験の結果と検討

Photo 2 にスラスト当たりで発生した AE 信号の波形例を示す。Photo 2 では持続時間の長い高振幅の AE 信号が記録されており、スラスト当たりは連続した金属接触現象であることがわかる。OP

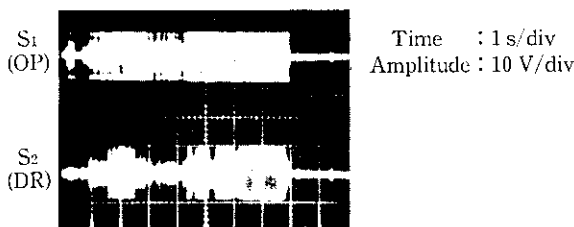


Photo 2 AE waveforms produced by thrust batting

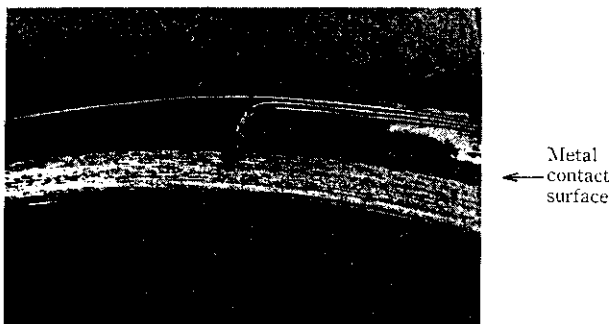


Photo 3 Bearing surface after thrust batting testing

側軸受でスラスト当たりが発生しているにもかかわらず、DR 側でも大きく受信されていることから、スラスト当たりで発生する AE 信号のエネルギーは非常に大きいことがわかる。Photo 3 にスラスト当たりで損傷したスラスト面を示す。

以上の結果からも、AE 計測法がスラスト当たりの検出に有効である見通しが得られた。

3.3 軸受損傷診断で障害となるノイズ

本研究では前述した軸受損傷実験のほかに、圧延中に実機で発生するノイズの測定実験を行った。この結果、前述した軸受損傷以外に、Fig. 5 に示すような音響信号が発生していることがわかった。すなわち、定常時においては BUR にスリーブを固定するためのキーによるスリーブ突出部とプッシングとの接触により BUR 1 回転につき 1 回の、Fig. 5 に示すような突発型信号が発生する。さらに非定常ではあるが、ラビングによる音響信号も発生する。ラビングは BUR と水切りワイパなどロール周辺の機械部品の接触などにより発生するもので、Fig. 5 に示すように BUR 1 回転につき 1 回の立上りのなだらかな音響信号が発生する。

これらの現象で発生する AE 信号は、すべり軸受の損傷診断を行ううえで、すべてノイズとして扱う必要がある。そこで、すべり軸受損傷現象の判別法も含め、ノイズとの弁別についても検討を行ったので次に述べる。

Noise name	Key contact	Rubbing
Condition	Normal	Abnormal
Cause of noise	Metallic contact between sleeve protrusion and bushing	Metallic contact between BUR and mechanical parts
Noise model		
Waveforms		

Fig. 5 Mechanism of noise in rolling

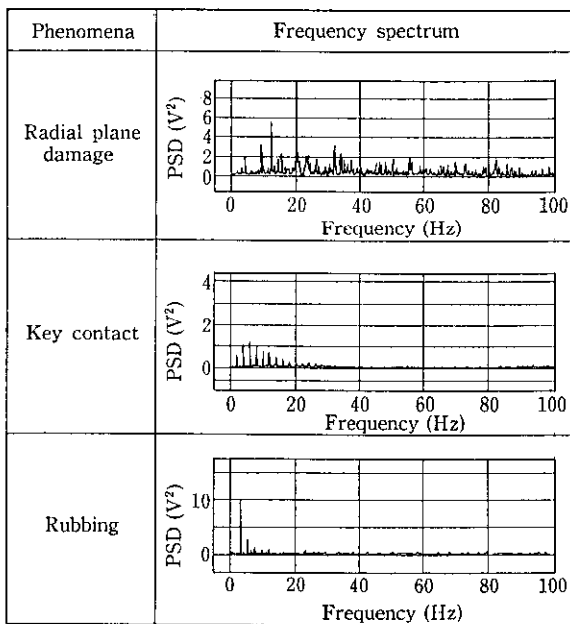
4 軸受異常判別のための信号解析

4.1 ラジアル面損傷判別のための信号解析

ラジアル面損傷とノイズを弁別するために次の解析を行い、それぞれについて可能性の検討を行った。

- (1) ラジアル面損傷で発生した AE 信号とノイズ波形の発生数、エネルギーおよび周波数の分析
- (2) ラジアル面損傷で発生した AE 信号とノイズ波形の包絡線検波処理波形の発生数、エネルギー、実効値および周波数の分析

上に述べた解析検討の結果、ラジアル面損傷とノイズを弁別するには、包絡線検波処理後の周波数分析が最も有効であることがわかったので以下に説明する。Fig. 6 に包絡線検波処理波形の周波数分析結果を示す。ラジアル面損傷の場合、0 Hz 付近から 100 Hz 程



PSD: Power spectrum density

Fig. 6 Frequency spectra of envelope detection signal

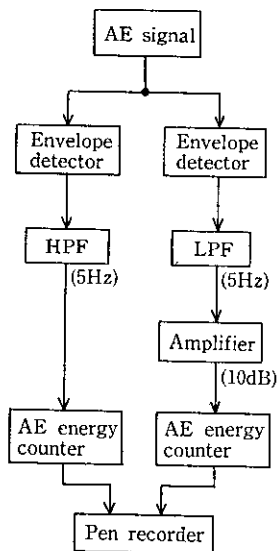


Fig. 7 Signal discriminating technique

度までの広帯域にわたって周波数成分が存在しているのに対し、キー当たり、ラビングで発生した包絡線検波処理波形の周波数の主成分は、BURの回転数に同調した低周波成分であることがわかる。

そこで、この違いを抽出するため、Fig. 7に示すように周波数フィルタとエネルギー回路を用いて処理を行った。すなわち、BURの最大回転数(300rpm程度)の5Hzを目安として、ロー・パス・フィルタ(LPF)とハイ・パス・フィルタ(HPF)による処理波形をエネルギー回路にて定量的に調べた。Fig. 8にその計測データ例を示す。キー当たりでは、LPF、HPFで処理した信号のエネルギー・カウント・レートがいずれも小さいのに対し、ラジアル面損傷の場合は、逆に双方とも大きくなっている。またラビングの場合は、LPFで処理した信号のエネルギー・カウント・レートは大きいですがHPFの出力は小さくなっている。この結果から、フィルタ処理後のエネルギーカウントにしきい値を設定することによって、論

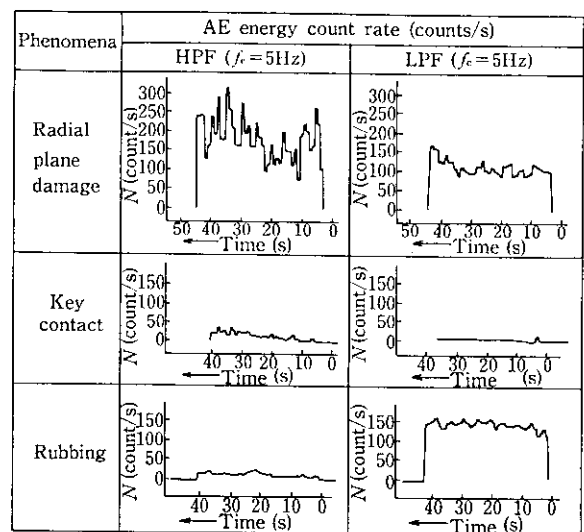


Fig. 8 Characteristics of AE energy

Table 2 Measuring results of AE signal duration

No.	Phenomena	AE Signal duration
1	Key contact	Less than 1 ms
2	Rubbing	Less than 20 ms
3	Radial plane damage	Less than 200 ms
4	Thrust batting	900~2 000 ms

理判断を行うことができることがわかる。

4.2 スラスト当たり判別のための信号解析

前述したようにスラスト当たりはOP側軸受のみで発生するので、AEセンサ S_1 で受信したAE信号に着目し、信号解析を行った。スラスト当たりで発生するAE信号はPhoto 2に示したように、ノイズや軸受のラジアル面損傷によって発生する信号に比べ、持続時間と振幅が格段に大きいのが特徴であるため、この特徴を抽出することにした。この測定結果をTable 2に示す。スラスト当たりによるAE信号は、他の現象に比べ持続時間が数十~数百倍も長いので、持続時間を計測すれば、スラスト当たりと他の現象で発生する信号の弁別が可能であることがわかった。

5 圧延機用軸受損傷診断装置の構成

4章で述べた信号解析結果をもとに、開発した軸受損傷診断装置のブロック図をFig. 9に、外観をPhoto 4に示す。

本診断装置では、センサで検出したAE信号を増幅後に包絡線検波をし、その出力を判別回路に入力する。判別回路は前章で述べた判別方法を採用し、LPF、HPFで処理した包絡線検波信号をエネルギー回路に入力し、信号のエネルギーカウント数を計測する。次に比較回路において、前記カウント数が設定値以上のときは「1」、設定値未満のときは「0」のロジック電圧信号(TTL: Transistor-Transistor-Logic)を出力する。一方、スラスト当たりの検出には、持続時間測定回路を用いている。持続時間は500msを基本とし、それ以上のときは「1」、未満のときは「0」のTTL信号が比較回路から出力される。

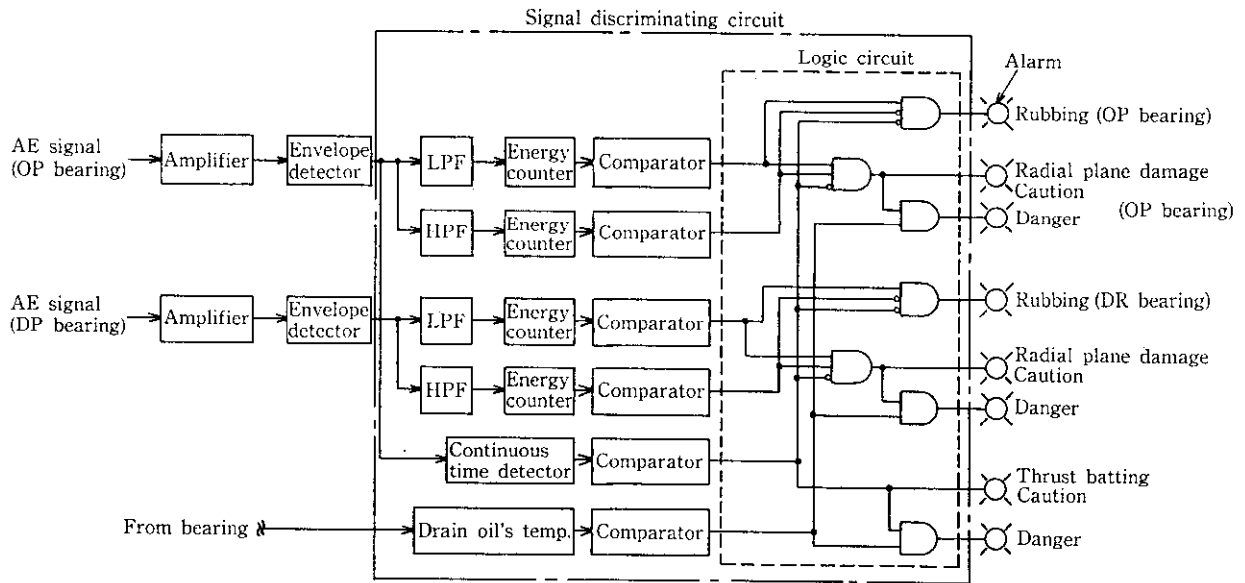


Fig. 9 A block diagram of bearing diagnostic equipment

Table 3 Logic operation of signal discriminating circuit

Out put		OP bearing		DR bearing		Continuous time detector	Alarm (caution)					Drain oil temperature		Alarm (danger)	
		HPF	LPF	HPF	LPF		OP bearing		DR bearing		Thrust batting	OP bearing	DR bearing	OP bearing	DR bearing
							Rubbing	Radial plane damage	Rubbing	Radial plane damage					
Normal (key contact)		0	0	0	0	0	×	×	×	×	×	0	0	×	×
OP bearing	Rubbing	0	1	—	—	0	⊙	×	×	×	×	0	0	×	×
	Radial plane damage	1	1	—	—	0	×	⊙	×	×	×	1	0	⊙	×
DR bearing	Rubbing	—	—	0	1	0	×	×	⊙	×	×	0	0	×	×
	Radial plane damage	—	—	1	1	0	×	×	×	⊙	×	0	1	×	⊙
Thrust batting		—	—	—	—	1	×	×	×	×	⊙	1	0	⊙	×

—: "1" or "0"
 ×: Alarm: OFF
 ⊙: Alarm: ON

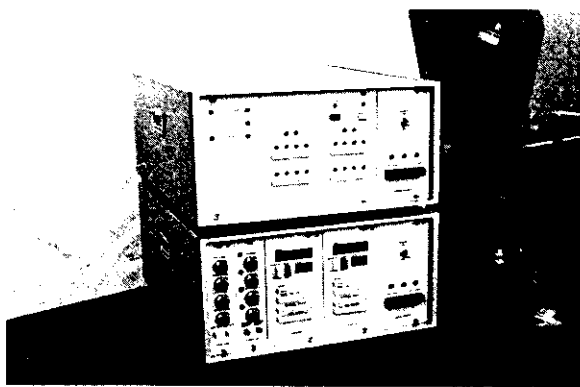


Photo 4 View of diagnostic equipment

上記の TTL 論理出力の組み合わせによりラジアル面損傷とスラスト当たりの検出は可能となるが、本装置ではノイズとの弁別も含

め、より確実な診断装置とするため、潤滑排油温度も要因として論理出力の組み合わせに入れることにした。すなわち、ラジアル面損傷時には排油温度が上昇するため、排油温度が基準値(約 63°C)を越えた場合は「1」、そうでない場合は「0」の TTL 信号を出力する機能を備えた。以上に述べた TTL 信号は Fig. 9 に示す論理回路に入力され、論理判断がなされる。Table 3 に各現象が発生した場合の論理出力と Fig. 9 に示した判別回路のアラーム動作状況を示す。Table 3 に示されるように、各現象ごとにアラームが点灯されるので、圧延のオペレータは容易に異常現象の種類を知ることができ、事故回避の処置を即座に採ることが可能となる。

6 結 言

AE 法による圧延機用すべり軸受の損傷診断技術の検討を行った。圧延中のノイズの測定と実機圧延機を用いた人為的軸受損傷実験と、その信号解析をもとに診断アルゴリズムを開発した。その結果、軸受損傷の主要因であるラジアル面損傷とスラスト当たり損傷

を、圧延中のノイズと弁別して、異常の種類を判別できる診断システムを開発することができた。

参 考 文 献

- 1) 佐藤式也, 米山隆雄: プラントエンジニア, 14 (1982) 2, 54~58