

ころがり軸受異常診断装置の開発

Development of Portable Detector of Defects in Rolling Bearings

宮崎 容治*

Yasuharu Miyazaki

土井 克彦**

Katsuhiko Doi

小松 重之***

Shigeyuki Komatsu

鷺沢 忍****

Shinobu Sagisawa

押谷 侃*****

Akira Oshitani

Synopsis:

In the field of maintenance, the importance of techniques for predicting defects in rolling bearings has been increasingly recognized.

To determine the extent of defects, the level of high frequency vibration generated by the defects has so far been used. However this method requires special techniques such as a comparison between the initial and the current values of the bearing and also setting-up of criteria corresponding to respective defects.

The newly developed F-K Bearing Health Checker indicates the extent of a defect with a new induced scale "Q," which is evaluated automatically by the built-in weighting network and calculating circuit, thereby requiring neither special techniques nor criteria according to the types of defects.

The weighting factor and calculating formula are obtained from vibration analyses and visual observation of defects in 2000 bearings which were damaged in the course of actual operation.

1. まえがき

近年の鉄鋼プラントは、設備の大型化、高度精密化、複雑多様化、自動化、連続化等の急速な進展にともなって、設備の故障による休止損失、設備修復改造費、保全費が膨大になり、テロテクノロジーの重要性がますますクローズアップされてきた。テロテクノロジーの主要な技術開発テーマのひとつに設備診断技術がある。

設備診断技術とは、設備の運転中にまたは設備を分解せずに、設備の内部の劣化または故障の兆

候を診断し、ストレスを定量化して故障あるいは寿命を予測する技術であり、近年、特に本技術の確立が望まれている。

設備診断技術の分野は非常に広く、かつ、ここからの技術分野ともいえるが、ここでは鉄鋼プラントをはじめ産業全般にわたって数多く使用されているころがり軸受に対する診断技術として、オン・コンディション・メンテナンス方式を具現化するための装置、すなわち、設備機械の運転中にその異常を簡単に精度よく診断するころがり軸受異常診断器を開発するために、1978年4月から富士電機製造（株）と共同研究を実施してきた結果、

* 水島製鉄所動力部動力技術室主任(課長待遇)

*** 水島製鉄所動力部動力技術室

***** 富士電機総合研究所製造技術研究所副主任研究員
〔昭和56年2月19日原稿受付〕

** 水島製鉄所動力部動力技術室主任(掛長待遇)

**** 富士電機総合研究所製造技術研究所主幹研究員

1980年6月に実用化に成功したのでここに報告する。

2. ころがり軸受の異常診断

2.1 異常検出

ころがり軸受の損傷劣化については多種多様の状況があり、これらの損傷劣化の検出方法としては Fig. 1 に示すように種々の方法が考えられるが、今回の開発器はころがり軸受の運転中に簡単に、精度良く、定量的に異常を検出する実用的な方法ということから、ころがり軸受から発生する振動

を検出するという方法を採用した。

一般に振動は設備機器の異常情報の優れた情報キャリアであると言われている。

これは温度やその他の変数に比較して、可動部を有する設備機械の場合はそれ自体が振動の発生源であり、特別な信号源が不要であること、早期または軽微の異常が検出可能であること、検出信号の計測および信号処理が比較的容易であることなどの特長を有しているためである。

2.2 損傷と振動

ころがり軸受は、それを構成する部品、たとえば外輪、内輪、転動体、保持器などが理想的な幾何学的形状をしていても、回転により転動体と転動面が軽微な衝突をくりかえすために、不規則な振動を生じる。この振動はその発生機構上、軸受単体で発生する場合と軸受を含めた回転系全体で発生する場合があります。軸受に種々の損傷欠陥がある場合には転動体に関する振動を発生する。

Fig. 2 に、ころがり軸受の振動および音の発生メカニズムを示す。

ころがり軸受の運転中の損傷は、ほとんどが転動体に生じ、転動体にキズやごみが存在するとその部分を転動体が通過するごとに、機械的な衝撃力を発生する。この衝撃力によって、軸受を構成している弾性体が、自由減衰振動を発生する。しかも、この弾性体は、固有振動数が高いので高調波を発生し、衝撃力の周期で変調され、軸受の振動となって外部へ伝達される。

ころがり軸受内の転動体は、正常な回転条件下において、理論どおりの公転が行われているとすると、その振動を解析することにより、どの部品に欠陥があるかを判定することが可能である。

玉軸受内の転動体にキズがある場合とか、ごみがある場合には、その判別は難しいが特徴のある振動現象を示す。また、キズの大きさ、キズの数などにより、振動レベルが明瞭に変化することは重要な現象である。

一般には、軸受の種類、使用回転数、さらには損傷の状況などが異なるために、衝撃力の周波数スペクトルや軸受各部の固有振動数が異なり、損傷によって発生する振動が共通した特定の周波数を有することはまれなことである。また、一個の

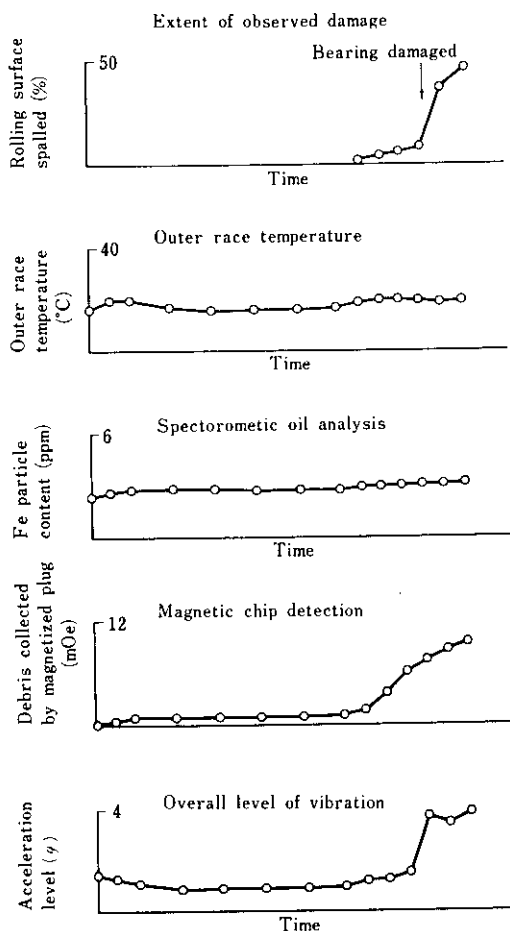


Fig. 1 Comparison of diagnosis methods for rolling bearings

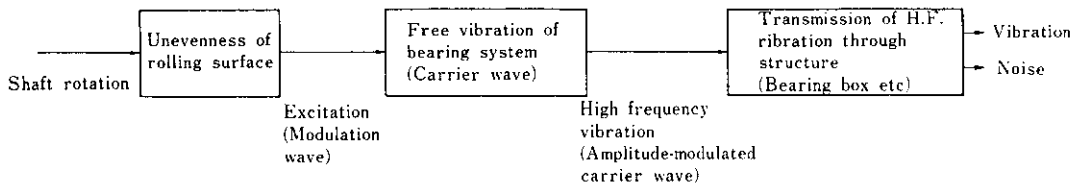


Fig. 2 Generating mechanism of vibration and noise

軸受に限っても、単一周波数を発生することは極めてまれなことであり、軸受より発生する振動波形は、その損傷劣化状況により千差万別のパターンを示すといえる。

2・3 損傷と振動周波数

2・3・1 軸受の損傷と理論的発生周波数

Fig. 3 に示すように、内外輪および転動体が接触角 α で接触しながら内輪が回転する場合を考えると、内輪にキズが存在する場合の発生周波数(f_i)は(1)式のように表わせる。

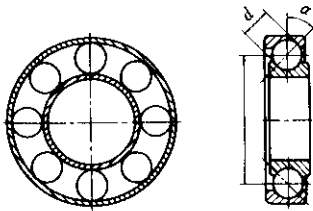


Fig. 3 Bearing configuration

$$f_i = \frac{Z \cdot f_r}{2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad \text{..... (1)}$$

f_r : 軸回転周波数 (Hz)

d : 転動体の直径

D : 軸受のピッチ直径

α : 接触角

Z : 転動体の数

外輪にキズが存在する場合の発生周波数(f_o)は(2)式のように表わせる。

$$f_o = \frac{Z \cdot f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \quad \text{..... (2)}$$

転動体にキズが存在する場合の発生周波数(f_b)は(3)式のように表わせる。

$$f_b = \frac{D \cdot f_r}{2d} \left\{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2 \alpha\right\} \quad \text{..... (3)}$$

(1)式、(2)式、(3)式より得ることのできる各部の発生周波数 f_i 、 f_o 、 f_b が基本となって、Table 1 に示すような各異常モードに対応した発生周波数が得られる。

2・3・2 実際の軸受よりの発生周波数

Table 1 は理論的に導出された結果であるが、実際上は使用条件や損傷状況などにより、いくつかの周波数が混在した形で生じる。

実際の軸受振動は衝撃力の比較的低い周波数と高周波の自由減衰振動が重ね合わされたものとなっており、この軸受振動を周波数分析すると、ほぼ1KHzから10KHz の間にいくつかの振動ピークを示す。それぞれの振動ピークは軸受各部の固有振動数に相当する。また、衝撃力の周波数は転動体の回転周期に一致し、ほぼ500Hz 以下である。

したがって、実際のころがり軸受振動は1KHz

Table 1 Characteristic frequencies caused by defects

Kind of defects	Outer race defected	Inner race defected	Rolling element defected	Inner race surface undulated	Outer race surface undulated
Characteristic frequency	$n f_o$	$n f_i$	$2 f_b$	$n f_i \pm f_o$	$(n \pm 1) f_o$
	$n=1, 2, 3, \dots$			$n=1, 2, 3, \dots$	

以上の自由減衰振動が 500Hz 以下の衝撃力の低周波で変調されたような波形となっている。波形の具体例については後述する。

3. ころがり軸受異常診断器の開発

3.1 簡易形ころがり軸受診断器の考え方

保全技術者が現場で使用する簡易形ころがり軸受診断器は、次のような条件を満足することが理想である。

- (1) 軸受の異常を区別し正確に指示すること。
- (2) だれにでも判定可能な尺度（判断基準）が導入されていること。
- (3) 損傷の種類によって判定レベルを変えなくてよいこと。
- (4) 使用に対して特別の訓練を必要としないこと。

先にも述べたように、軸受振動の原波形を種々の信号処理技術によって適切な処理を行い、発生周波数の解析などを行うといった方法は、軸受診断の有効な方法のひとつといえる。Fig. 4 に代表的な損傷の周波数スペクトルを示す。しかし、周波数解析を行うことは、軸受の異常部位の検出が可能であるとか、より精密な診断が可能であるといった種々の特徴がある反面、軸受全体としての

良否判定の方法としては、解析に要する時間、解析の複雑さなどの面で上記条件を満足しない。

開発した診断器は、上記の診断器としての具備すべき条件を満たしたものであり、軸受より発生する振動加速度を高感度の圧電形加速度ピックアップで検出し、フィルタ処理を行ったのち、包絡線化回路で波形の復調を行って振動加速度の波高値 G_{PEAK} 値と振動加速度の実効値 G_{RMS} 値を求める。その後、損傷の種類や程度による重みを考慮した計算を行って、異常の判定を行うための特別な尺度を導入している。

Fig. 5 に開発した診断器のブロック回路図を示す。以下、これについての詳細説明を行う。

3.2 診断器の回路構成

3.2.1 ころがり軸受振動の検出

軸受振動は、先にも述べたように、1 KHz 以上の高い周波数を主成分とするために、それを検出するのは難しい。開発した圧電形加速度振動ピックアップは、手持式にもかかわらず、高い固有振動数（25KHz 以上）と高感度低ノイズの特性を有する。

この振動ピックアップの使用により、10KHz ま

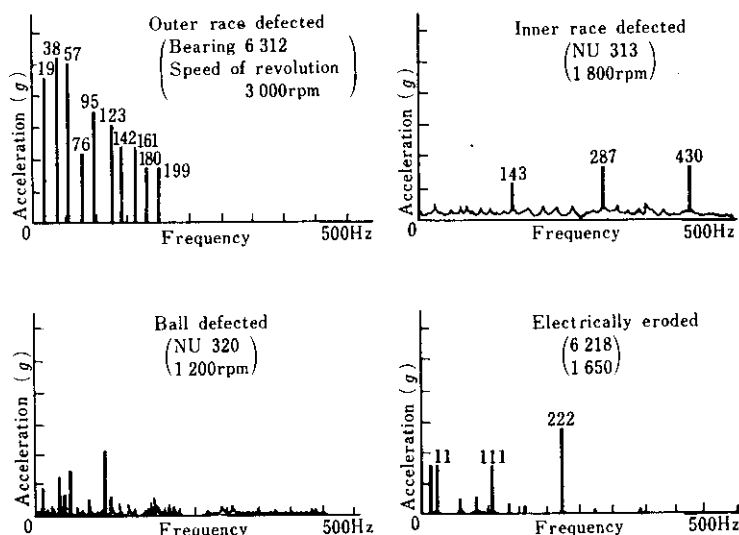


Fig. 4 Typical frequency spectra of defected bearings

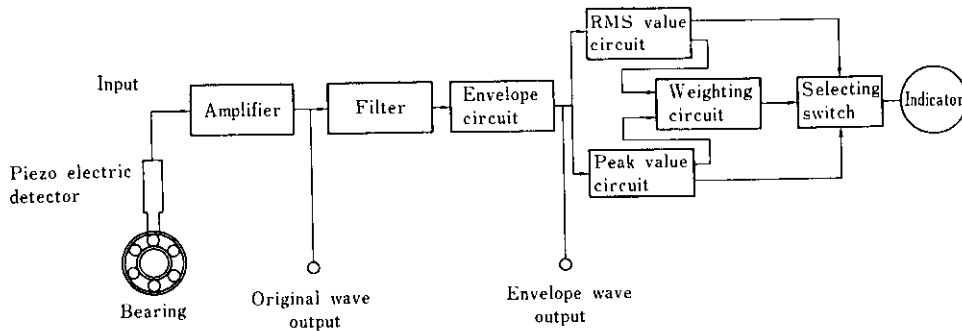


Fig. 5 Block diagram of F-K Bearing Health Checker

で安定した測定が可能である。

3・2・2 包絡線化回路

Fig. 2 に、軸受の欠陥が外部に振動加速度として検出されるまでのメカニズムを示したが、検出される波形は、軸受固有振動数を搬送波とすると、これを軸受の損傷による衝撃波で変調したものに相当する。

損傷の程度や種類を判別するためには、必要な搬送波のみを選出して、それを復調し、もとの損傷による衝撃波を取り出すことが必要である。

Fig. 6 に外輪に損傷のある軸受の周波数分析結果を示す。図に示すように搬送波すなわち振動加速度をそのままレベル表示しても、損傷の特徴を正しく表わすことは難しい。このため、本装置の復調回路には通常用いられる検波整流方式回路は用いずに、包絡線化回路を用いた。包絡線回路で処理した波形を分析した図中のピークが外輪の転動面にある損傷部を転動体が通過する時の発生周波数である。包絡線化回路を用いた理由は、搬送波の周波数と異常の情報の周波数が接近しているために検波整流方式回路では良好な復調が得られな

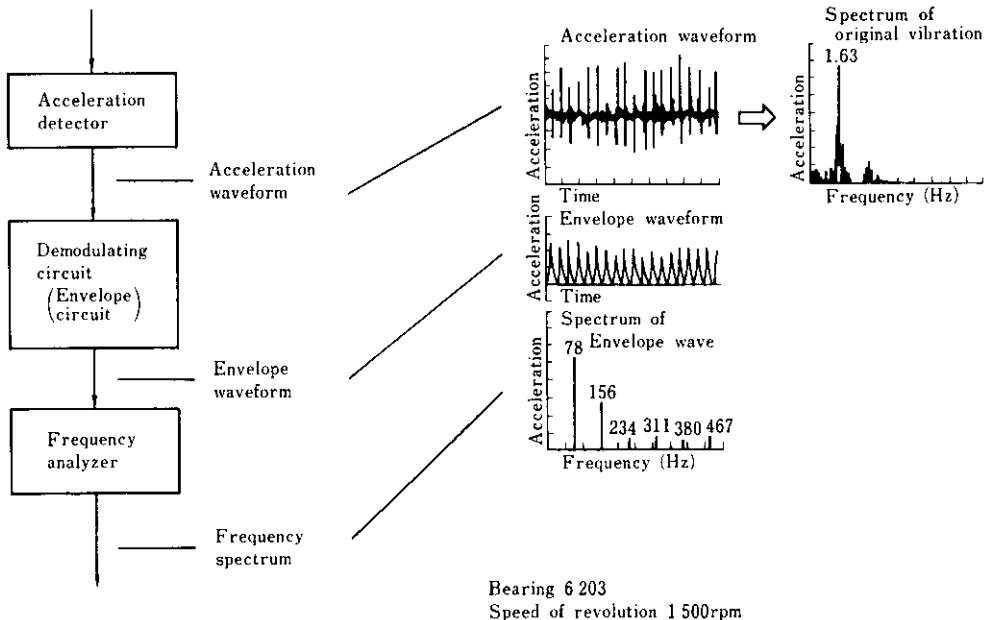


Fig. 6 Waveforms and spectra before and after envelope processing in the case of frequency analysis of rolling bearing with outer race defected

ったからである。さらに復調回路の前には、ミスカップリングや不つり合いによって生じる低周波の振動と、検出器の共振や軸受以外より発生する高周波の振動を除去するフィルター回路を設けた。

3・2・3 損傷の種類による重みを考えた異常判定尺度の導入

すでに Fig. 6 で示したように、復調した波形の周波数分析で異常の種類の判定が可能であることより、復調波形が軸受異常の情報として有効なことは明らかである。したがって、今回の異常の程度の判定も、この復調波形によることにした。

異常の程度の判定が誰にでも行えるためには新しい尺度の導入が必要であり、その尺度は次の条件を満足すべきである。

- (1) 異常の程度を明確に示す尺度であり、かつ、物理的に理解できること。
- (2) 損傷の種類に関係しない尺度であること。すなわち、損傷の種類によって異なる判定レベルを補正する重みをつけること。

異常の程度の尺度について以下に述べる。

判定尺度および判定基準の決定のために約2000個の軸受について、振動加速度のレベルとその波形を記録した。さらに、その軸受を分解して、損傷の種類と程度を調査した。

損傷した軸受の例を Photo. 1, Photo. 2 に示す。

Photo. 1 は転動部が全体的に焼き付き寸前の円筒軸受で、Photo. 2 は外輪にフレーキングが生じている玉軸受である。

これらのフィールドデータについて、復調した波形の実効値、波高値、クレストファクター、波形分析等と目視による損傷の種類と程度を対比してみると次の結論が導き出せた。

すなわち、同じ種類の損傷については、損傷の程度は実効値と波高値の関数 f_n として、(4) 式のように表わせる。

$$f_n(A_{RMS}, A_{peak}) = F_C \cdot (A_{RMS})^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$F_C = \frac{A_{peak}}{A_{RMS}}$$

A_{RMS} : 復調波形の実効値

A_{peak} : 復調波形の波高値

F_C : 復調波形のクレストファクター

また、この(4)式はランダム波形におけるエネルギーを表わす式と理解できる。

次に損傷の種類による重み係数の導入について以下に述べる。

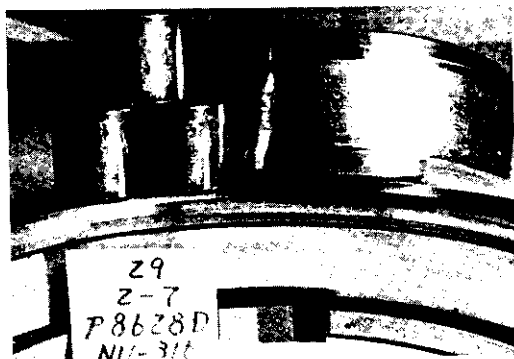


Photo. 1 Spall defect in inner raceway

前述のフィールドデータおよび実験によれば、新しく導入した(4)式の尺度でも、損傷の種類によって判定レベルが異なることが判明した。損傷の種類に関係しない判定尺度とするためには、損傷の種類に対する重み係数を導入する必要がある。

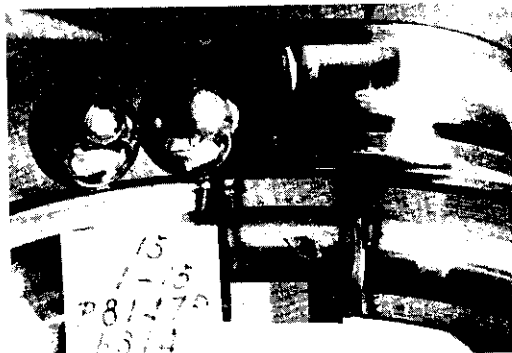


Photo. 2 Spall defect in outer raceway

損傷の種類は波形によって判定できることは、これまでも述べたが、さらに、波形はクレストファクターで代表することができる。すなわち、(1) 正常な軸受、摩耗、焼付きの場合の波形はランダム波に近く、クレストファクターは5に近い値となる、

(2) 軸受の転動面や転動体にキズがある場合の波形は、クレストファクターが5より増大する、

(3) 組込み不良や電蝕状態の軸受の波形は、クレストファクターが5より低下する。

したがって、重み係数はクレストファクターの5の値を標準としたクレストファクターの関数とすることにし、判定尺度、すなわち、異常指数 Q は(5)式のように定義した。

$$Q = K \cdot F_c \cdot (A_{RMS})^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 K は重み係数であり、この値はフィールドデータおよび実験より決定したものである。

3・2・4 異常指数 Q による判定レベルの決定

前述のフィールドデータを Q 値で示し、その損傷状態の判定と対比したものをFig. 7に示す。

縦軸は異常指数 Q で、横軸は転動体の速度の指標 $D_m \cdot N$ 値(軸受の平均直径(mm)×回転速度(rpm))である。

図中の○●●印は軸受分解による損傷の程度の判断結果を示し、○印は正常状態、●印は軽微な損傷、●印は著しい損傷を示す。

このデータより明らかなことは

- (1) 損傷の種類には無関係に、軸受が正常か異常かを判別することができる。
- (2) $D_m \cdot N$ 値が 2×10^5 以上では判定レベルは一定であり、 2×10^5 より低い所では判定レベルは $D_m \cdot N$ 値に関係して変えるのが妥当といえる。 $D_m \cdot N$ 値が 2×10^5 の状態は丁度 EHL 油膜の形成による公転滑りの発生する速度にほぼ相当する。
- (3) この図は電動機の玉軸受のデータによるものであるが、円筒軸受の場合は判定基準が約10%～20%高めになるものとみられる。しかしながら、円筒軸受は玉軸受に比べてデータの数が少ないために、現状では安全側をとって同じ判定レベルを適用するのがよい。
- (4) 軸受スキマについては判定レベルに有意差がなかった。

3・3 開発診断器によるころがり軸受の診断方法

開発診断器(F-Kベアリングヘルスチェッカー)で測定した異常指数(Q)から、ころがり軸受を診断する場合には、二つの方法がある。

第1の方法はFig. 7の判定グラフを使用して診断するものである。Fig. 7の判定グラフの「Good」ゾーンは正常なころがり軸受であり、「Caution」ゾーンは損傷の初期状態のために定期的な監視を行う必要があり、「Replace」ゾーンは損傷が、か

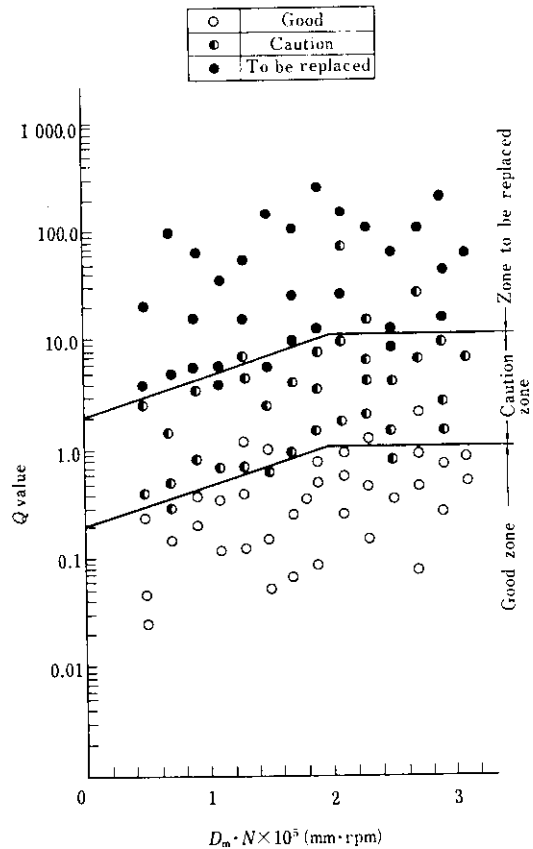


Fig. 7 An example of criteria for ball bearings installed in motor

なり進行しているために早急に交換する必要があるという判定となる。

第2の方法は、正常状態の軸受の初期値との比較によって診断するものであり、この方法の対象となる軸受は、電動機以外の機械で次のようなものがある。

- (1) 軸受部分の構造が複雑で、振動の伝搬状態が通常とは大幅に異なる機械。
- (2) ポンプのキャビテーションのように高い周波数成分を含む機械。
- (3) 軸方向の動きが大きい機械および衝撃を発生する機械

本方法は、まず正常時の Q 値を測定し、機械の性質や測定条件などを考慮し、 Q 値の経時変化により、正常時の Q 値に対する倍率や変化の急峻度で判定する方法である。

この両者の方法を比べてみると、長所と短所が

それぞれある。

第1の方法は、判定グラフがあるために、健全な軸受の初期値との対比なしに判定が可能であるという反面、限界保全すなわち軸受寿命の限界まで使用するという面では、多少ではあるが余裕のある判定基準となっている。

第2の方法は、本器を使って、正常時の Q 値に対する倍率や変化の急峻度について最適な判定基準などのソフトを作れば、診断精度の面では向上する可能性があるという反面、初期値の測定や比較といった作業面でのおずらわしさが生じる。

4. 本診断器の仕様および特長

4.1 仕 様

Photo. 3は開発した診断器（名称：F-Kベアリングヘルスチェッカー）である。

検出器仕様および本体仕様についてはTable 2に示す。

4.2 特 長

本器の特長について、以下に示す。

- (1) 健全な軸受の初期値との対比なしに判定が可能である。すなわち、異常の判定を基準化しているために、正常時からの振動レベルの監視や、機種別による判定レベルの管理などが不要である。
- (2) 判定のための特別な訓練が不要である。本器で測定した異常指数（ Q ）により、軸受の各種の損傷を一義的に判定するために、診断には熟練を必要とせず、容易に精度よく診断できる。
- (3) 振動検出器は、広帯域の周波数応答特性を有



Photo. 3 Front view of F-K Bearing Health Checker

Table 2 Specifications of F-K Bearing Health Checker detector unit

Construction	Built-in preamplifier, piezo-electric acceleration pickup
Frequency range	100Hz-10kHz (± 3 dB)
Maximum continuous acceleration	100g
Operating temperature	-20°C - $+80^{\circ}\text{C}$
Main unit	
Measurement range	6 ranges
'Q' value indication	Full scale 0.01-1 000
'G' (peak and rms) value indication	Full scale 0.3-100
Voltage output	Original wave output : Max. 5V (for earphone connection and recording with tape recorder)
Envelope wave output	Max. 5V
Operating temperature	$0-40^{\circ}\text{C}$
Power source	UM-1 dry battery (4)
Dimensions	170 (W) $\times$ 85 (H) $\times$ 275 (D)
Weight	2.3kg (with batteries)

し、測定時の接触共振などに対しても考慮した構造としている。

(4) 軸受の損傷部位などの精密診断を行うための原波形、包絡線化波形の出力端子も準備している。

5. ころがり軸受診断の実例

5.1 水島製鉄所圧延工場の電動機ころがり軸受診断

Fig. 8 に診断結果を示す。診断対象は圧延工場のころがり軸受を使った電動機を無作為に抽出して、オンザマシン状態で異常指数 (Q 値) の実測を行い、かつ、その軸受を分解し、損傷状況の裏付けを行った。

Fig. 8 中の A ラインは Q 値ベースでの「Good」ゾーンと「Caution」ゾーンの境界線を、B ラインは「Caution」ゾーンと「Replace」ゾーンの境界線を示している。

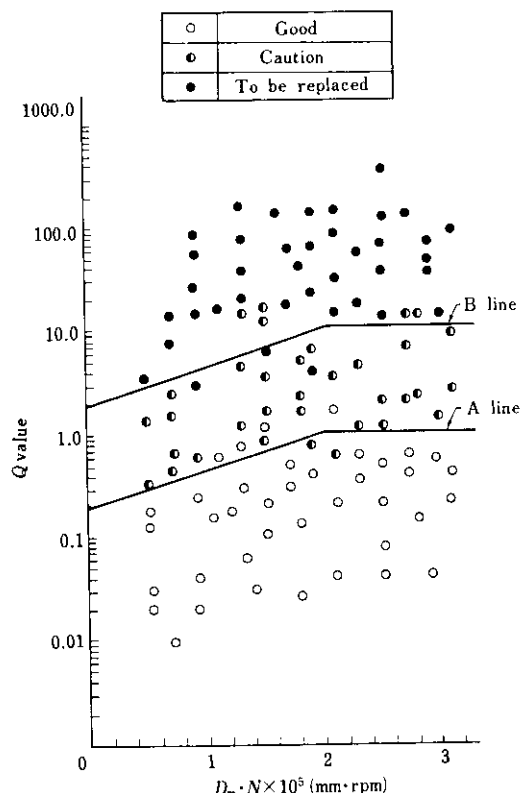


Fig. 8 An example of criteria for ball bearings installed in electrical motor

診断結果のまとめを下記に示す。

- (1) A ライン以下のレベルにある軸受は正常であることを示し、診断精度は90%以上である。
- (2) A ラインとBラインの間のレベルにある軸受は注意を要するもので、この領域には分解した結果で、正常と判定したもの、注意状態と判定したもの、不良と判定したものが混在している。注意状態と判定したものは、ほぼ80%であるが、その他はグリースの充足状態や測定箇所の問題もあり、バラツキがでたものと考えられる。
- (3) B ラインより高いレベルにある軸受は不良すなわち取替を必要とするものであることを示し、診断精度はほぼ90%である。

5.2 サイリスタ整流冷却ファン用電動機ころがり軸受診断

Fig. 9 に診断結果を示す。診断対象電動機は IK-FCKL 1.5kw, AC220V1730rpm で診断台数は41台 (負荷側, 反負荷側合計で82データ) である。

本診断についても 5.1 と同様に Q 値の実測を行い、かつ、その軸受を分解し、損傷状況の裏付けを行っているが、高い診断精度を示している。

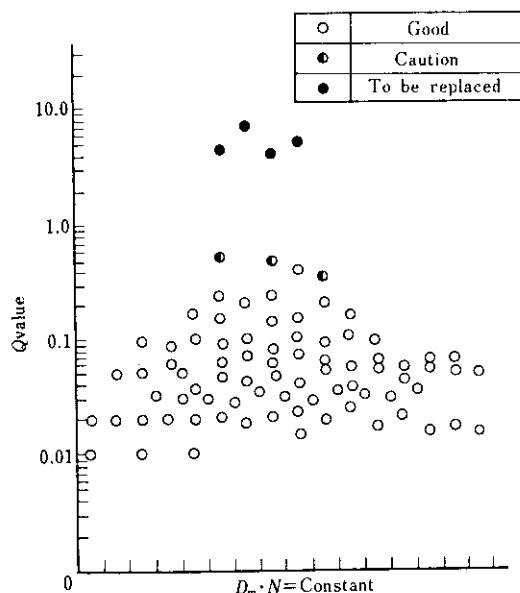


Fig. 9 Diagnosis results of ball bearing installed same size fan motors for cooling thyristors (comparison of diagnosis results between Q level and visual observation)

6. あとがき

ころがり軸受の異常診断技術を確立するために軸受から発生する振動加速度を異常指数(Q)として、尺度化したころがり軸受異常診断器(名称:F-Kベアリングヘルスチェッカー)を開発した。

本器は、回転機械の運転中に、ころがり軸受の

異常を簡単に、かつ精度よく診断する装置であり、鉄鋼プラントで数多く使用されている回転機のころがり軸受に対してオン・コンデションメンテナンス方式の導入を可能とし、保全コストの低減、生産性の向上に寄与できるものと確信する。

今後は本器による診断精度の向上を含む診断技術全般のレベルアップ、応用技術の確立を図るとともに、鉄鋼をはじめ工業プラント全般にわたる設備診断技術の確立に努力していく所存である。

参 考 文 献

- 1) R.M.Stewart: Vibration Analysis as an Aid to the Detection and Diagnosis of Faults in Rotating Machinery, Conf. vibr. Rotating Mach. (1977), C192/76 Cambrige
- 2) 市田、堀見: 設備異常診断と予知保全技術資料集大成, (株)フジテクノシステム, (1977)
- 3) J.I.TAYLOR: Identification of Bearing Defects by Spectral Analysis, Transactions of the ASME 79-DET-14, (1979), 1~6
- 4) S,BRAUN, B.DATNER: Analysis of Roller/ Ball Bearing Vibrations, Transactions of the ASME 101 (January 1979), 118~125
- 5) 西尾ほか: 振動の監視による転がり軸受の故障の早期発見に関する研究, 航空宇宙技術研究所報告 TR-601 (1980)