

技術論文

波形観測にもとづくその場計測と機械設備異常診断への応用

Practical Application on Diagnostic Analysis to Testing Machines

By Observing Noise Signals in Plants

三菱電機 (株)
神戸大学大学院

宇佐美 照夫
小島 史男

Teruo USAMI
Fumio KOJIMA

Member
Member

This study discusses a practical application of diagnostic signature analysis to testing machine plant. The specific features of acoustic signal from rotating machines are caught by diagnostic signal analysis. As a result, the automated inspection and diagnosis of the rotating states of motors have become possible. For the diagnostic technique composed of signal averaging and normalization method is used. The statistical classifications using a characteristic function and an estimated function have proved their usefulness. The practical inspection equipment based on this analysis for rotating machines has been developed and tested in one of plants.

Keywords: Diagnosis, Signature Analysis, Rotating Machine, Power Plant, Machine Plant

1. 緒言

機械系の診断に騒音を利用しようという研究は、被試験系の内部状態の変化が騒音波形の変化に比較的早く反映されることと、および被検査系の内部状態の変化を運転時に波形観測にもとづきその場計測により非接触に、しかも簡便な計測系で信号をとらえることができるという大きな利点があり、異常診断技術の一つとしておこなわれている。

機械の内部状態とその騒音波形との間にはなにがしかの相関があることは経験的には明らかであるが、完全に1対1の対応をするわけではなく、あくまでも機械自身が発生する騒音の波形を解析し、その特性の変化を抽出し被検査系の機械設備の異常診断を行うという観点から考察をおこなう。

聴覚による回転機の騒音検査は官能検査の中でもっとも機械化が困難といわれている。現在、この種の検査は熟練した検査員の聴感により異常を検出しているが、騒音検査を機械化して置き換えることが望まれる。

本研究はプラントで稼働中の回転機の騒音を解析しそれらの異常を「その場計測」により抽出し機械設備

の異常診断への応用を目的とするものであるが、騒音波形の基礎データを収集し解析するだけの机上検討でおわるのではなくフィールドでの試験をおこないフィールドデータの考察から研究成果を社会での実用化可能な機能を実証することが最終目的である。研究の対象としていく回転機の異常音は、騒音にうずもれて判別できないような微小なものであり、特別に訓練された検査員のみが判別可能なものである。これらの異常音の特徴抽出のためには、まず騒音波形に平均化、正規化、騒音波形の「正常音」「異常音」の分類などの騒音波形解析をおこなう。その解析結果をもとに開発した騒音検査機についての実験室でのテスト結果およびプラントでのフィールドテストでの評価結果について考察する。2章では被検査機器の回転機自身が発生するプラントでの騒音データの測定と騒音解析について述べる。また、回転機からの騒音はどのようにして発生しているのか、またどのような性質をもっているのかについて考察する。騒音解析の結果から異常音の種類について考察する。3章では検査システムの原理構成と、実験室でおこなったテスト結果について考察する。4章では提案した騒音検査機を製作し、プラントでのフィールドテスト評価をおこないその有効性を考察する。5章では本研究で得られた考察結果を要約する。

◆連絡先：宇佐美 照夫

三菱電機 (株) 先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
E-mail: Usami.Teruo@ap.MitsubishiElectric.co.jp

2. 騒音波形

2.1 騒音の測定

騒音検査は熟練した検査員の聴感により異常を検出している。騒音検査を機械化することを目的にプラントで検査員が聴感で異常を検出している騒音データを収集する。騒音の測定をおこなったサンプル総数は39で検査員がすでに「良品」「不良品」の判別済みのサンプル(良品 10,不良品 29)を用いた。これらのサンプルに対して基準状態として無響室の中で運転を行ないマイクロフォンにて騒音測定した。測定時に於ける周辺音条件は無響室で 40dB、プラント内防音室で 65~70dB である。マイクロフォンで収音した騒音波形の時間軸上での回転同期信号を得るために He-Ne レーザーとフォトディテクターを組合せ、光束を羽根の間を通し回転数信号を形成させた。回転機の運転は 60HZ 電源、正転のみとする。サンプルは一台ずつ約 30 秒間通電され、回転させるという測定法をおこなう。

2.2 騒音の解析

プラントでの騒音検査により異常音を抽出する解析法は確定した方法というものは存在しない。プラントでの雑音はいろいろな騒音源からの騒音が重畳したものであり不規則性が非常に強い信号と考えられる。これらの騒音の特性の相違を区別することができ回転機の特徴をとらえることのできる特性量を正確に抽出できる検査系を構築することが重要である。本章では騒音検査の機械化を目的としてプラントでのその場計測可能な騒音波形処理法を提案し不良品からでる異常音の抽出をおこなう。

まず時間軸上で回転に同期した平均化処理を行う。時間軸上での回転に同期した平均化とは回転機の羽根に着目しその羽根がある位置(例えばその羽根がレーザー光束を遮った時)にきた時を時間軸上での基点として騒音波形を記録し、次に羽根が同じ位置にきた時再び騒音波形を記録する。これらの記録した各波形の振幅値を式(2.2-1)で平均をとる。

いま1つの量子化された騒音波形を

$$x_i(\ell)$$

$$\ell=1, \dots, n$$

i: 波形記録番号 ℓ : 量子化番号 n: 量子化数

とすると 平均化処理は

$$\bar{x}(\ell) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i(\ell) \quad (2.2-1)$$

$$\ell=1, \dots, n \quad m: \text{平均化回数}$$

となる。本研究では $n=1024, m=16$ である。

騒音波形解析の前処理として時間軸上での正規化法について提案する。回転機器の回転数は見かけでは一定であるが、回転機器の1回転する時間は各回転毎に僅かな差異が生じる可能性があり、サンプル個々についてみると微妙な相異がある。このような1回転時間の異なる騒音波形について解析すれば本来得るべき情報が失われている可能性がある。このことから1回転周期による時間軸での正規化を行う。その処理法は回転同期の信号をリファレンス信号として、絶対時間でサンプリングし量子化した波形を拡張あるいは短縮することによって1回転分についてn個のサンプリングを行なったごとく変換することである。演算法としては補間法を用いる。

回転時間による波形の正規化は、入力される X と 1 回転分について n 個のサンプリングを行なったごとく回転パルスに同期し変換されたベクトル X' は

$$X = (x(1), \dots, x(\ell_k), \dots, x(n))^T \quad (2.2-2)$$

$$X' = (x'(1), \dots, x'(k), \dots, x'(n))^T \quad (2.2-3)$$

であらわす。

式(2.2-2) X と式(2.2-3) X' の関係は式(2.2-4)である。

$$x'(k) = (x(\ell_k + 1) - x(\ell_k)) \{i + (j/n) \cdot k - \ell_k\} \quad (2.2-4)$$

ここで

|i-j|; 回転同期パルスでの一周期

k; 整数

ℓ_k ; $\{i + (j/n)k\}$ よりも小さい値の最も近い整数

回転周期で正規化した正規化ベクトル X' は、式(2.2-1)の時間軸平均化処理をおこない騒音波形ベクトル X に変換する。

$$X = (X_i(1), \dots, X_i(\ell_k), \dots, X_i(n))^T \quad (2.2-5)$$

ここで

$$X_i(\ell) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i'(\ell)$$

$\ell=1, \dots, n$ m : 平均化回数

式(2.2-1)、(2.2-2)、(2.2-3)、(2.2-5)で提案した騒音解析を用い 2.3 節で異常音抽出とその種類を考察していく。

2.3 異常音の種類

プラントでの良品不良品の測定データをもとに判別した異常音について考察する。「不良品」に発生する異常音は「S音」「K音」とよばれているものに分類される。

S音とは「摺動音」の略であり、ニスのたれやメタルの油切れなどによって擦過音を発生するものをいう。S音は定常性があり一回転中に定位置に、しかも毎回転あらわれている。

K音とは「コトコト音」の略である。これは軸受部にキズなどの異常があり単発的な音を発生する。この種の不良品の中には、常時異常音を発するのではなく、2～3秒の断続周期で音が発生するものが多い。

Fig.1に良品サンプルの騒音波形を示す。Fig.2にS音を発生しているサンプルの騒音波形を示す。Fig.3にK音を発生しているサンプルの騒音波形を示す。各々、プラント内における上段が時間軸波形、下段が周波数軸波形である。

Fig.1は良品サンプルの騒音波形処理の結果、良品のパワースペクトラムには特異なピークは発生せず、ただ高周波になるに従ってパワーレベルが低下していることが観測できる。

Fig.2のS音に関しての時間波形には、Fig.1の良品の場合は存在しなかった成分が観測できる。これは時間軸で考察すると1回転周期中のある時間部分のみに現れている。周期は約0.8msecであり周波数に換算すると、1.3KHZ付近である。この成分はパワースペクトラムに於いて明確にピークとして現れていることが観測できる。

Fig.3のK音のパワースペクトラムに於いて720Hz付近の成分及びピークは顕著には存在しない。これはプラントでは低周波の暗騒音がありかつそのレベルは大きく変動する。このためS音より低周波域で現れる

K音はS音より暗騒音の影響を受けることとなる。すなわち、K音の場合は測定時の周辺騒音に対する考慮が必要となる。ランダムノイズの影響を低減することを目的に前節で提案した式(2.2-5)であらわされる騒音波形を基にK音の同一サンプルの防音室での時間軸波形および周波数軸波形をFig.4(a)、時間平均をおこなったデータをFig.4(b)に示す。

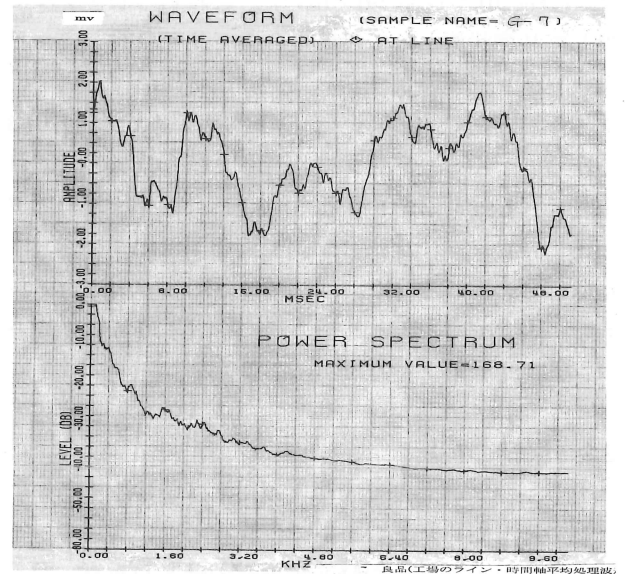


Fig.1 Noise of normal sample

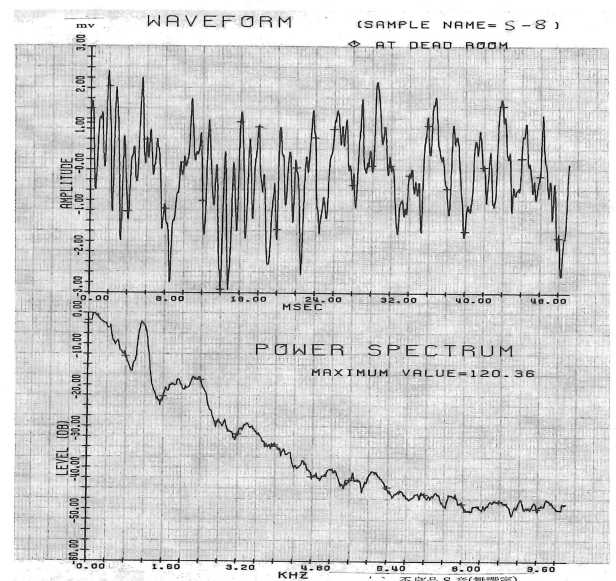


Fig.2 Noise of abnormal(S) sample

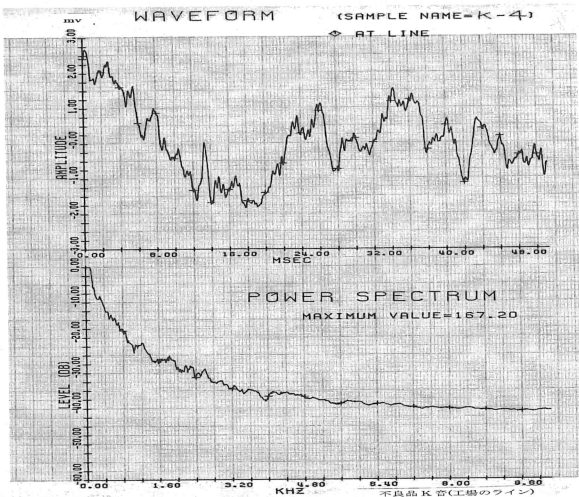


Fig.3 Noise of abnormal(K) sample

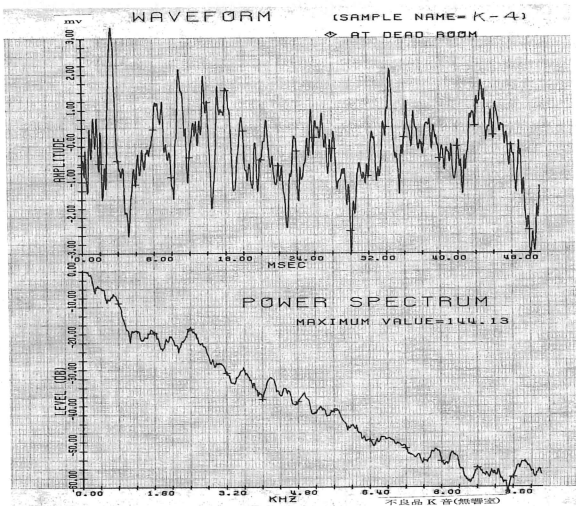


Fig.4 (a) Sound wave of abnormal (K) sample

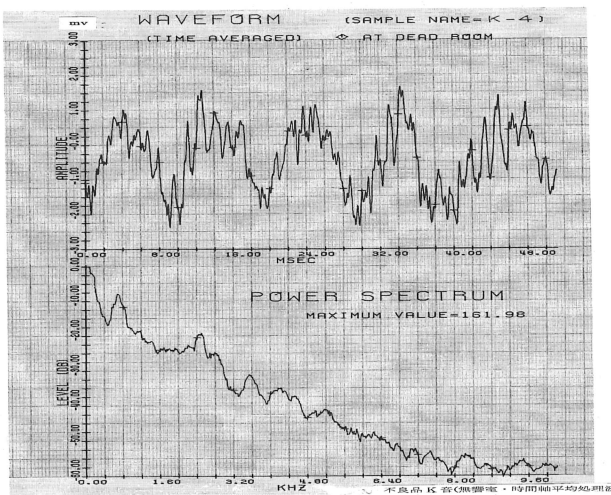
Fig.4 (b) Sound wave of abnormal (K) sample
(Time averaged)

Fig.4 (a)、Fig.4 (b)を比較すると時間平均をおこなった Fig.4 (b) では 720Hz 付近の成分のピークが顕著に抽出され K 音抽出には時間平均の効果は大であることがわかる。

3. 騒音検査システムの検討と試験

3.1 検査システムの原理構成

検査方式は Fig.5 に示す。回転機器からの騒音波形信号は同一の利得、位相特性をもつ複数のマイクロフォンにより収集される。外乱騒音による影響により検査システムが誤動作を防止するためにマイクロフォンを回転機に対し空間的に軸対称に複数個配置する。増幅器を通過した後、位相制御部で 1 回転周期による時間軸での正規化を位相制御部でおこなう。その処理法は前章で有効性を実証した式(2.2-2)~(2.2-4)で示される解析法で回転同期の信号をリファレンス信号として絶対時間でサンプリングし量子化した波形を拡張あるいは短縮することにより 1 回転分について n 個のサンプリングを行なったごとく変換する演算を AD/DA コンバータ付加の DSP にておこなう。

位相制御部で正規化された騒音波形信号は加算器にて加算されることにより検査着目点の信号源以外からの外乱成分となる騒音波形は位相ずれにより打ち消しあい、逆に同位相の信号源からの信号は加算され相対的に増大する効果を受けて騒音波形の入力信号の S/N 比は増大する。加算された騒音波形は前章の騒音波形解析により抽出された S 音帯域(1KHZ~1.5KHZ)、K 音帯域(400HZ~800HZ)に設定された異常音検出用バンドパスフィルターへ送られる。もし、異常音が発生していなければ(すなわち良品なら)バンドパスフィルターを通過した後の出力波形の振幅は大きく減衰する。S 音あるいは K 音が発生している場合は減衰しない。

比較部では S 音、K 音各レベル設定器により良品、不良品の境界値を設定し、設定された境界値より振幅の大きい信号が入力するたびに異常音発生個数を表すパルスが発生する。異常音発生回数累積部では異常音発生パルスをカウントアップして累積する。検査システムでは異常音(S 音、K 音)の発生累積数の設定器により異常音発生パルスの境界値個数がデジタルで設定できる。カウンターで異常音発生パルス数が境界値個数以上に達すると異常音(S 音、K 音)と判断し、その発生を表示するランプがつき警報ブザーが鳴る。この

設定値にパルスの個数が満たなかった場合には「正常 (Good)」を表示する。リセットボタンを押せば次の検査が開始される。

このバンドパスフィルタを通過した騒音波形が設定レベル以上の異常音が発生するたびに、その発生累積数を増加させ一定累積数に達した時に不良品であると判定する波形の累積処理は前章の時間軸平均処理と等価な処理である。すなわち式(2.2-5)の騒音波形ベクトル X を用いて「正常」「異常」の判別をおこなったと等価となる。

プラントでの突発的な外乱に対しての誤動作をふせぐ機能として回転機の設置箇所の周囲で発生する過渡的な騒音による影響を避けるためにノイズ集音用マイクロフォンを複数個設置する。それらの入力信号の振幅レベルが設定された境界値以上になればタイマーが働き自動的に検査を中断して累積数を保持する機能を付加している。検査中断時間は 10msec. に設定した。これらの機能により誤動作の発生は減少した。波形解析における特徴抽出にとって有効な手段である。

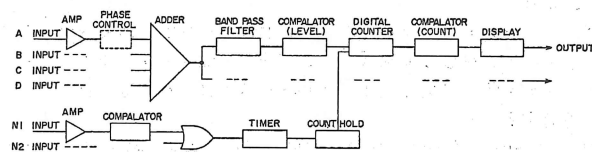


Fig.5 Block diagram of practical diagnostic

3.2 実験室でのテスト結果

異常音の検査システムを用いて研究所内の実験室(暗騒音、54dB(A)程度)において次の条件で実験を行った。実験にはすでに検査員によって「正常」、「異常」判別された回転機をサンプルとして用いた。サンプル総数は 39 である。内訳は良品サンプル 10、S 音発生サンプル 24、K 音発生サンプル 5 である。

- ① 検査回数は各サンプル S 音に関して 5 回、K 音に関して 5 回、計 10 回である。
- ② 検査時間は 10 秒/回である。
- ③ 異常音設定スイッチ(デジタルスイッチ)の設定値は“6”に設定する。

その場計測で騒音波形を観測し回転機の検査をおこなう試作システムの正確さを検討する関数として、次の評価関数を定義した。

実験結果を評価するためにサンプルが S 音、K 音にどれくらい類似しているかを表す関数として

$$P_{(S)} = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} \left(1 - \frac{\gamma_i}{t_i} \right) \quad (3.2-1)$$

$$P_{(K)} = \frac{1}{N_K} \sum_{i=1}^{N_K} \left(1 - \frac{\gamma_i}{t_i} \right) \quad (3.2-2)$$

$$0 \leq P_{(S)} \leq 1 \quad 0 \leq P_{(K)} \leq 1 \quad (3.2-3)$$

NS	S 音の検査回数	NK	K 音の検査回数
t _i	検査時間	γ _i	反応時間*
P(S)	S 音への類似度	P(K)	K 音への類似度

反応時間* : 検査を開始して異常音(S 音、K 音)の発生累積数の設定器により設定された異常音発生パルスの境界値個数にカウンターでの異常音発生パルス数が達する時間異常音(S 音、K 音)と判断するまでに要した時間

サンプルが S 音、K 音でない程度、すなわちどれくらい良品に類似しているかを表す関数は

$$\bar{P}_{(S)} = 1 - P_{(S)} = 1 - \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} \left(1 - \frac{\gamma_i}{t_i} \right) \quad (3.2-4)$$

$$\bar{P}_{(K)} = 1 - P_{(K)} = 1 - \frac{1}{N_K} \sum_{i=1}^{N_K} \left(1 - \frac{\gamma_i}{t_i} \right) \quad (3.2-5)$$

$$0 \leq \bar{P}_{(S)} \leq 1 \quad 0 \leq \bar{P}_{(K)} \leq 1 \quad (3.2-6)$$

次に、良品であるかの関数は

$$0 \leq P_{(G)} = \min(\bar{P}_{(S)}, \bar{P}_{(K)}) \leq 1$$

$$0 \leq \bar{P}_{(K)} \leq 1 \quad (3.2-7)$$

Table 1 Results at field

	G-7	S-8	K-4
P(G)	1.00	0.00	0.20
P(NG)	0.00	1.00	0.80
P(S)	0.00	1.00	0.00
$\overline{P(S)}$	1.00	0.00	1.00
P(K)	0.00	0.04	0.80
$\overline{P(K)}$	1.00	0.96	0.20

逆に不良品であるかの関数は

$$0 \leq P_{(NG)} = \overline{P_{(G)}} = \min(\overline{P_{(S)}}, \overline{P_{(K)}}) = \max(P_{(S)}, P_{(K)}) \leq 1 \quad (3.2-8)$$

全サンプル 39(G10,S24,K5)について評価関数を用いた評価結果は、検査委員の判定結果と一致した。正常サンプル、S音発生サンプル、K音発生サンプルの各代表サンプルの評価関数を用いた評価結果例を Table 1 に示す。これらの評価関数 P(G)、P(S)、P(K)は、それぞれ良品、S音、K音にどれくらい類似しているかを表している。そこでサンプル G-7 について考えてみると、S音に関しては、P(S)=0よりS音成分はないということが考察できる。同様に、K音についても同様であるということが評価関数から考察できる。サンプル S-8 についても

$$P_{(S)} = 1, \overline{P_{(S)}} = 0, P_{(K)} = 0.04, \overline{P_{(K)}} = 0.96$$

という評価結果からS音の発生は明らかであるが、わずかにK音も現れていることが考察できる。サンプル S-8 の騒音波形を観察してみるとK音成分である400HZ~600HZにピークが現れている。これまでの議論と同様にP(K)=0.8でK音を発生していることを評価関数から考察できる。

4. フィールドテスト

4.1 検査システムの改良

騒音検査システムの評価のためにプラントにてフィールドテストをおこなう。プラントでの雑音対策のた

め検査システムを改良した。検査時の雑音として騒音検査システムの機能に影響をあたえるものとしてプラントの稼動音や、人の声などが予想される。このようなプラントでの突発的な外乱に対しての誤動作をふせぐためには計測系の改良をおこない雑音除去機能を設置した。具体的には Fig.5 に示すように回転機の設置箇所の周囲で発生する過渡的な騒音による影響を避けるためにノイズ集音用マイクロフォンを複数個設置した。それらの入力信号の振幅レベルが設定された境界値以上になればタイマーが働き自動的に検査を中断して累積数を保持する機能を付加している。検査中断時間は10msec.に設定した。これらの機能により誤動作の発生は減少した。この機能は騒音検査システムでの波形解析における特徴抽出にとって有効な手段である。

4.2 プラントでのフィールドテスト

フィールドテストは被検査体個々につき検査員と騒音検査システムの検査結果を列記する方法で評価をおこなった。その結果、

- ① 騒音検査機と検査員の一致率をRとすると

$$R = \frac{\text{判定の一致した数}}{\text{総サンプル数}}$$

$$R = \frac{950}{1046} = 0.908$$

一致率Rは90.8%である。

- a) 検査中あきらかに雑音が混入したと認められる場合を除くと

$$R' = \frac{950}{(1046 - 15)} = \frac{950}{1031} = 0.921$$

一致率R'は92.1%である。

- b) 検査員個々の検査結果は
検査員 A (副主任) の場合

$$R(A) = \frac{645}{697} = 0.925$$

一致率R(A)は92.5%である。

検査員 B の場合

$$R(B) = \frac{305}{349} = 0.874$$

一致率R(B)は87.4%である。

② 再測定での一致率

初回測定の結果判定不一致の場合、被検査体をふたたび再検査をおこなった。不良品の場合エージングをおこない3~4回まで再検査をおこなっている、生産性には全く影響がでないので再度データ収集をおこなった。

$R'' = (\text{騒音検査機と検査員の一致した数}) / (\text{総検査数} - \text{初回不一致で再測定をおこなわなかった数})$

$$= \frac{(950 + 60)}{(1046 - 22)} = \frac{1010}{1024} = 0.986$$

最終的に、一致率 R'' は 98.6% と考察できる。

本研究で提案した騒音波形処理法を用いた騒音検査システムを評価するためプラントでおこなったフィールドテストでは検査システムと検査員との検査一致率 98.6% を得ることができた。この結果からプラントで検査員と同等の能力を持っているとの考察できた。

5. 結言

本研究で得られた考察結果を要約する。

(1) その場計測で回転機器の異常診断について騒音波形観測から不良の物理現象と対応する特徴を抽出し、良品、不良品の特徴波形信号を特定できた。不良品は発生原因により分類できることを確かめた。異常音の抽出については騒音波形の時間軸上での回転周期で正規化をおこなうことが重要である。この特徴抽出に関しては異常音成分に定常性がない場合、時間軸上での平均化処理をあらかじめ行なっておくことが重要であることを考察した。これらの騒音波形解析結果から、異常音を S 音、K 音の特徴抽出するための騒音波形解析法を提案した。S 音は 1 回転周期分の波形で周波数軸上で 1.2KHZ 付近にピークが生じ、K 音は多数回の回転周期分の騒音波形で正規化し時間平均処理を行なうと 700HZ 付近にピークを生じることを観察した。

(2) 騒音波形の解析結果を適用した騒音検査システムを試作し評価関数を定義し、検査員が「良品」「不良品」と判別したサンプル総数 39 個による評価をおこなった。その結果、実験室の暗騒音環境で良品、S 音(摺動音)、K 音(擦過音)の各サンプルの評価結果は検査員の判別結果と一致した。その結果、提案した検査システムで良品、不良品を分類できることが考察できた。

(3) 実プラントにてフィールドテストをおこなった結果、検査員との検査一致率 98.6% を得ることができた。プラント内での騒音波形観測にもとづくその場計測による回転機械設備異常診断への適用可能性があることを考察できた。

参考文献

- [1] 日本音響材料協会, 「騒音対策ハンドブック」, 技報堂, 1966
- [2] 内藤, 「工業計測ハンドブック」, 朝倉書店, 1976
- [3] 池辺, 「自動制御機器便覧」, オーム社, 1971
- [4] 磯部, 「関連関数およびスペクトル」, 東大出版会, 1968
- [5] J. S. Bendat & A. G. Piersol, “Random Data”, Wiley-Interscience, 1971
- [6] 榎木, 添田, 中溝, 「統計的自動制御理論」, コロナ社, 1966
- [7] K. Fukunaga, “Introduction to Statistical Pattern Recognition”, Academic Press, 1972
- [8] 日科技連, 「官能検査ハンドブック」, 1973
- [9] T. Koizumi, T. Usami, “Signal Detection System”, US Patent, 4165458, Aug. 21, 1979
- [10] 小泉, 宇佐美, 「異常信号を判定する信号判定装置」, 日本国特許公報, 昭 60-50397, 1985
- [11] 井上, 宇佐美, 小泉, 「検出装置」, 日本国特許公報, 昭 61-6440, 1986
- [12] 山本 鎮男, 「ヘルスマニタリング」, 共立出版, 1999/08
- [13] 日本非破壊検査協会, 「新非破壊検査便覧」, 日刊工業新聞, 1992/10

(平成 19 年 11 月 11 日)