

# 高精度振動波形解析による機械の異常診断

## Online Monitoring Technology by Analysis of Highly Accurate Oscillatory Waveform to Diagnose Abnormality of Machines

明智 吉弘 AKECHI Yoshihiro 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）  
縁川 悟 MIDORIKAWA Satoru 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（課長）  
小林 伸二 KOBAYASHI Shinji JFE メカニカル メンテナンス事業本部 設備診断技術部京浜設備診断室

### 要旨

JFE スチールグループでは、従来、異常判定が困難であったすべり軸受、往復動回転機械および低速回転機械などについて、振動波形を統計的手法により処理することで早期に異常判定が可能な診断システムを開発し、実機適用を図るとともに外販を開始した。現在までに、転炉誘引通風機（IDF）モーターのすべり軸受異常や往復動回転機械であるプランジャーポンプの吸入吐出弁欠損などの早期異常検知を実現している。

### Abstract:

JFE Steel Group has developed a diagnostic system that determines early abnormalities by processing vibration waveforms by using statistical methods for journal bearings, reciprocation machines and low-speed rotary machines. The developed system was applied to the production facilities and its marketing started at the same time. To date, the companies have succeeded in detecting early abnormalities of journal bearings of induced draft fan motors in converters and reciprocation rotation machines such as the loss of the inhalation valves and the exhalation valves of plunger pumps.

## 1. はじめに

JFE スチールグループでは設備診断技術を設備管理上の必要不可欠な技術と位置付け、30 年以上前から開発に取り組み、製鉄設備への適用や外販を行ってきた。特に、回転機械の振動診断技術については、古くから着手し継続的な改善を実施している<sup>1)</sup>。本稿では従来、早期異常判定が困難であったすべり軸受、往復動回転機械および低速回転機械などの診断技術について紹介する。

## 2. 高精度振動波形解析による 機械の異常診断技術の開発

回転機械の振動異常判定は振動速度、振動加速度などを測定し、最大値（peak）や実効値（rms）などをあらかじめ定めた基準値と比較して、良否判定を行うことが一般的である。この手法では高速回転機械の一定回転かつ一定負荷条件の転がり軸受などの場合は良否判定技術が確立されて

いるが、すべり軸受、往復動回転機械および低速回転機械などでは振動値にバラツキがあったり、異常の末期にならないと振動値に大きな変化が表れないなどの理由により、異常判定が困難であった。そこで、計測波形から得たパラメータを抽出し、主成分分析やカルバック情報量などの統計的手法により、波形の特徴を捉えた新たなパラメータを生成して、設備の異常による波形の変化をパラメータの変化として傾向管理し、異常判定を行う診断システムを開発した。

### 2.1 主成分分析を活用した 有次元・無次元統合パラメータによる 振動診断技術

#### 2.1.1 有次元・無次元パラメータの抽出

本手法では、表 1 に示すとおり、まず計測した振動波形から最大値、実効値、平均値、回転周波数成分値などの有次元パラメータと、波形率、波高率、衝撃指数、ひずみ度、尖り度などの無次元パラメータを抽出する<sup>2)</sup>。

#### 2.1.2 主成分分析の実行

主成分分析は多変量解析手法の一つであり、多数のパラメータ（因子）が異常事象（結果）を支配していると考え

表 1 有次元パラメータおよび無次元パラメータの例

Table 1 Example of dimensional parameter and nondimensional parameter

Kind of parameter	Parameter
Dimensional parameter	The maximum value, Root mean square value, Mean value, Rotation frequency element value $\times n$ ; $\times 1/2$ ; $\times 1/3$ ; $\times 0.4$ , Frequency element value of bearing defect
Nondimensional parameter	Wavy rate, Peak-to-rms ratio, Impact index, Skewness, Kurtosis

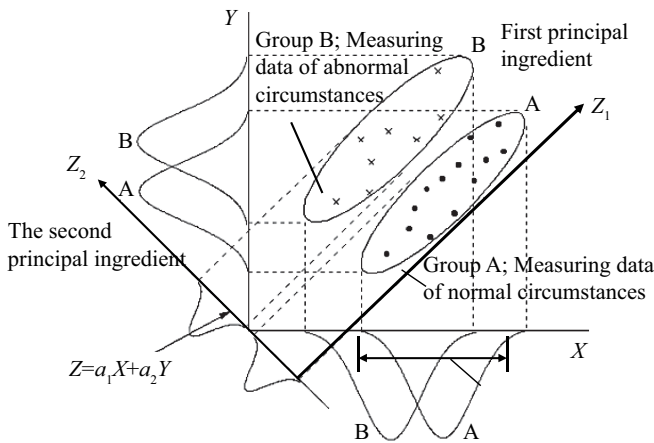


図 1 主成分分析のイメージ (2変数  $X, Y$ ) の場合

Fig. 1 At the image of the principal component analysis (two variables  $X$  and  $Y$ )

られるときに、その支配的な成分を抽出する手法である。有次元パラメータも含め、無次元化したパラメータを線形結合したものを主成分と呼び、主成分の分散が最大となるように定める手法である (図 1)。具体的には正常時のデータ (グループ A) について測定値  $X$  の分散が最大となるように第 1 主成分方向を決定する手法である。バラツキが大きくなるように線形結合したわけであるから、測定データと比較すれば、正常時の集合から外れた場合 (グループ B)、明らかに違う集合として、異常の判別が可能となる。

2.1.3 統合パラメータの生成

前述の正常時に求めた主成分  $Z_i$  (母集団) が、正規分布に従うと仮定する。この母集団から独立に取り出された  $N$  個の標本で構成される統計量  $\chi^2$  は、自由度  $N-1$  のカイ 2 乗分布に従う (カイ 2 乗分布の定理より)。

$$\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2} \dots\dots\dots (1)$$

$\chi^2$ : カイ 2 乗値,  $N$ : 標本数,  $s^2$ : 標本分散,  $\sigma^2$ : 母分散

ここで、母集団から取り出した  $n$  個の標本を  $X_1, X_2, X_n$  とすると、標本分散  $s^2$  は、

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2}{(N-1)} \dots\dots\dots (2)$$

となる。また、主成分  $Z_i$  の母分散  $\sigma^2$  は固有値  $\lambda_i$  に等しいので、(2) 式の  $X_i$  を主成分  $Z_i$ 、 $\bar{X}_i$  を  $\bar{Z}_i$  に置き換えると、

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Z_i - \bar{Z}_i}{\sqrt{\lambda_i}} \right\}^2 \dots\dots\dots (3)$$

$Z_i$ : 第  $i$  主成分  
 $\bar{Z}_i$ : 第  $i$  主成分  $Z_i$  の平均値  
 $\lambda_i$ : 第  $i$  主成分の固有値

となる<sup>3)</sup>。

本技術では (3) 式の両辺を  $\chi^2(\phi, \alpha)$  で除した値、

$$S = \frac{1}{\chi^2(\phi, \alpha)} \sum_{i=1}^{\phi} \left\{ \frac{Z_i - \bar{Z}_i}{\sqrt{\lambda_i}} \right\}^2 \dots\dots\dots (4)$$

$\phi$ :  $\chi^2$  分布の自由度  
 $\alpha$ : 有意水準

を有次元無次元統合パラメータ  $S$  と定義している。

図 2 は有意水準  $\alpha$  と有次元無次元統合パラメータ  $S$  の正常範囲との関係を表したものである。正常時に採取したデータのうち、有意水準  $\alpha$  により正常範囲を指定する。たとえば、 $\alpha=0.05$  のとき、信頼区間 95% (正常時データの 95% の範囲) となり、楕円の中心が  $S=0$ 、楕円上が  $S=1$  となるため、 $S \leq 1$  の領域が正常状態確定領域とすることができ、測定データがどれだけ正常データから離れているかを有次元無次元統合パラメータ  $S$  で評価し、この  $S$  値を傾向管理することにより、設備の異常判定を行う。

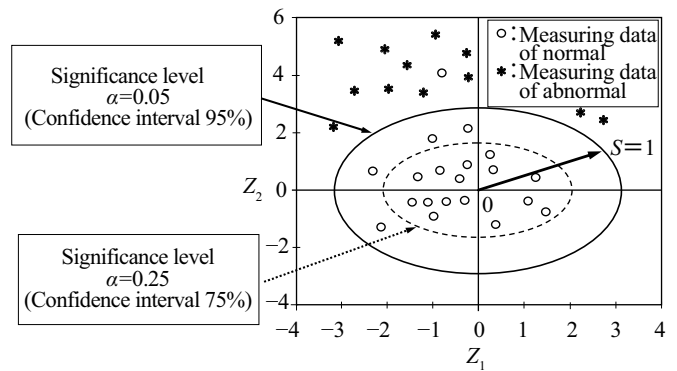


図 2 有意水準  $\alpha$  と有次元無次元統合パラメータ  $S$  の正常範囲との関係

Fig. 2 Relation between significance level  $\alpha$  and state amount  $S$  normal range

## 2.2 カルバック情報量による振動診断技術

### 2.2.1 振幅確率密度関数の抽出

測定した振動波形から振幅確率密度関数  $P(x)$  を抽出する。

図3は振幅確率密度関数の抽出イメージである。

振幅確率密度関数  $P(x)$  は振動波形の実効値 (rms) 値で正規化し、振幅の最大値を分割数  $d$  で割って分割幅とし、各幅に含まれる数を数えて密度関数の元波形とする。実際の異常診断では図4のように正常時の基準データと異常判定を行う測定データからそれぞれの振幅確率密度関数  $P_r(t)$  と  $P_t(t)$  を抽出する。

### 2.2.2 確率密度関数変化の定量化

次に振幅確率密度関数の変化を定量化するため、対称型カルバック情報量 (以下、ID 値)<sup>4)</sup> を求める。

$$ID = \int \{P_r(t) - P_t(t)\} \log \frac{P_r(t)}{P_t(t)} dt \dots\dots\dots (5)$$

$P_r(t)$ : 基準データ (正常時データ) の振幅確率密度関数

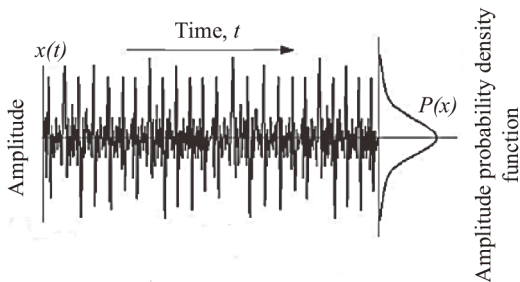


図3 振幅確率密度関数抽出イメージ

Fig. 3 Extraction image of amplitude probability density function

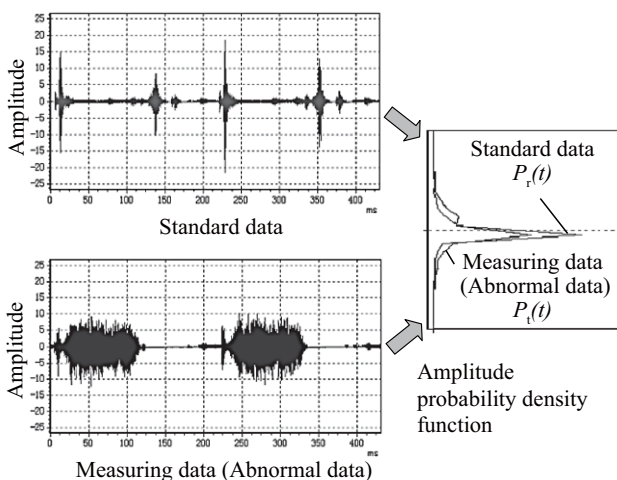


図4 基準データと測定データの振幅確率密度関数抽出イメージ

Fig. 4 Extraction image of amplitude probability density function of standard data and measuring data

Shape of waves of Kullback-Leibler divergence of symmetry type

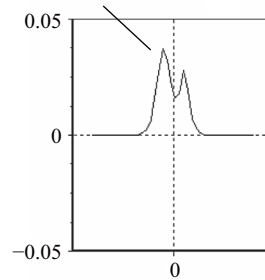


図5 ID情報量波形算出例

Fig. 5 Example of shape of waves of Kullback-Leibler divergence of symmetry type (ID)

$P_t(t)$ : 測定データ (異常評価データ) の振幅確率密度関数

$t$ : 時間 (ms)

図4で求めた基準データ (正常時データ) の振幅確率密度関数  $P_r(t)$  と測定データ (異常評価データ) の振幅確率密度関数  $P_t(t)$  から (5) 式により ID 値を算出する。

図5は図4の波形から ID 情報量波形を算出した例である。基準データと測定データの波形の差が ID 情報量波形に表れているのが確認できる。また、ID 値は図5の波形の値を積算した面積となる。

## 3. 高精度振動波形解析による基礎試験評価

図6のような多段渦巻きポンプによるオフライン試験装置を製作し、軸受部に振動センサー、AE センサーなどを設置して、すべり軸受の焼付き検知試験を実施した。

ポンプは多段渦巻きポンプ (電動機: 5.5 kW, 軸受メタル: WJ1, 軸受用潤滑剤: タービン油 (VG-46)) を使用した。まず、回転数  $1460 \text{ min}^{-1}$  で正常状態におけるデータを一定時間収集後、軸受ケーシング下の排出口から油を抜き、軸受締結部に  $0.1 \text{ mm}$  のシムを挿入して偏芯させることで負荷を与え、焼付き試験を行った。

図7に試験時間と振動速度ピーク値 (VEL-P), 振動加速度ピーク値 ( $1/5\text{ACC-P}$ ), 実効値 ( $\text{ACC-R}$ ) および AE

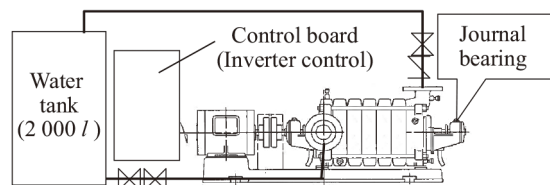
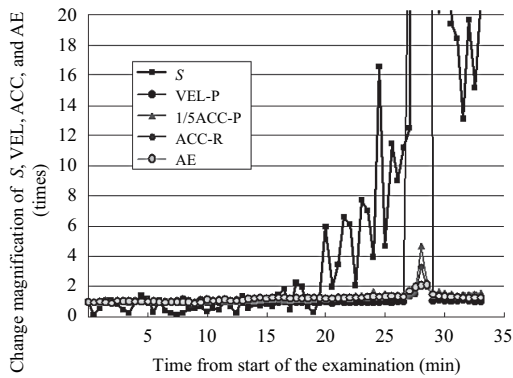


図6 基礎試験評価装置の概要

Fig. 6 Outline of basic examination evaluation device



S: Parameter that integrates having dimensionparameter and nondimension parameter  
 VEL-P: Velocity-Peak  
 1/5ACC-P: 1/5Acceleration-Peak  
 ACC-R: Acceleration-Root mean square value  
 AE: Acoustic emission

図7 すべり軸受焼付き試験結果

Fig. 7 Journal bearing burning test result



写真1 焼付き試験終了後のシャフト部写真

Photo 1 Shaft photograph after burning examination ends

(acoustic emission) の変化倍率の測定結果を示す。試験開始 27 分後から約 2 分間、焼付きの初期現象であるかじりによる金属接触音（キュルキュル音）が発生した。この間、VEL-P、1/5ACC-P、ACC-R および AE などの従来パラメータは一時的に値が上昇するものの、すぐに元のレベルまで低下するため、異常判定は困難であったが、本技術（有次元無次元統合パラメータ S 値）では、従来パラメータより 7 分早い試験開始 20 分後からバラツキながらも急激に大きく上昇し、早期異常検知が可能であることが確認できた。さらに、58 分後以降、連続した金属接触音となり、焼付き臭も伴ったことから試験開始後 68 分が経過した時点でポンプを停止し、実験を終了した。写真 1 は実験終了後のシャフト軸受部の写真である。

## 4. 実機検証

### 4.1 システム概要

図 8 に実機化システムの概要を示す。各設備の軸受などに振動センサーを設置し、試作した高速データ収集装置により定期的に振動波形を収集して、20 回 /min の周期でデータ収集パーソナルコンピュータに転送される。データ収集

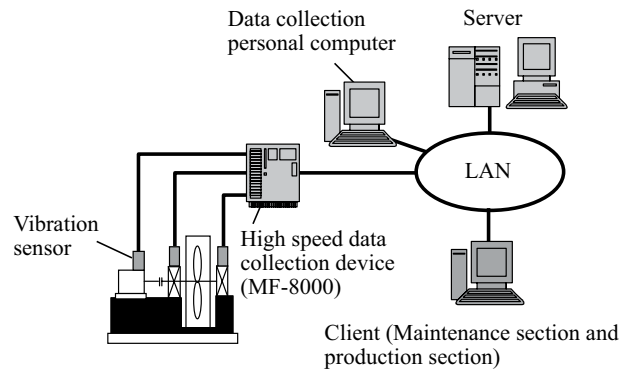


図 8 実機化システム概要図

Fig. 8 Block diagram of system of making to real machine

パーソナルコンピュータはモニタリングサーバーにデータを転送し、クライアント（保全・工場）がサーバーのデータを確認できるようになっている。

### 4.2 主な特徴

本システムでは 26 ~ 38.4 kHz の高速サンプリングが可能である。そこで、最大 30 秒間の波形収集ができる高速データ収集装置を試作することで、低速回転機械においても統計的手法によるパラメータ生成を行う上で、十分な波形採取ができるようにした。

### 4.3 実機適用事例

次に、本技術を実機に適用し、転炉 IDF (induced draft fan) モーター（すべり軸受）および厚板ブランジャーポンプ（往復動回転機械）で早期異常検出した 2 つの事例を紹介する。また、低速回転機械においても高炉原料装入コンベア減速機 (24 min<sup>-1</sup>) 軸受の内輪疵の検出などに成功している。

#### 4.3.1 転炉 IDF モーターの例

まず、転炉 IDF モーターの例を示す。図 9 は転炉 IDF モーターのすべり軸受に設置した振動センサーから採取したデータの傾向管理グラフである。

従来手法では、4 月 6 日に加速度注意値超えが発生したものの、その後、大きな上昇はなく注意値付近で上下しながら推移した。したがって、異常であることの認識が遅れる可能性があった。一方、統計的手法の有次元無次元統合パラメータ S 値は 4 月 2 日に 45 倍となり、バラツキながらも大きく上昇して行った。

そこで、S 値が上昇した原因を調査するため、各パラメータを確認すると図 10 のように、ACC-fr (加速度回転周期成分)、ACC-IP (加速度衝撃指数) などが 4 月 2 日以降上昇しており、回転周期の衝撃振動が発生してきていることが判明した。以上のことから、軽微なメタル接触か、軸受ハウジング部のガタ発生などが考えられ、あるいは、オイルリング接触部の摩耗なども考えられた。開放点検を行った結果、オイルリング半割り接続部のズレを確認し、補修後は振動

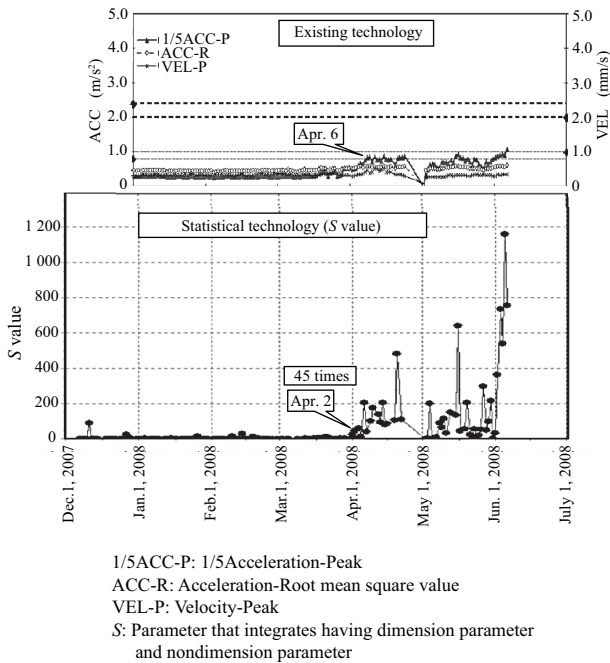


図9 転炉 IDFモーター傾向管理グラフ

Fig. 9 Tendency management graph of IDF motor in converter (Average data of day)

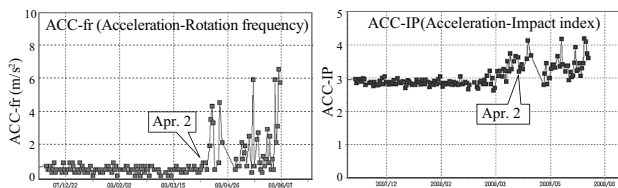


図10 転炉 IDFモーター異常検出時の各パラメータ変化

Fig. 10 Each parameter change IDF motor in converter abnormality detects it

が低下した。

#### 4.3.2 厚板デスケーリング用プランジャーポンプの例

次に、厚板デスケーリング用プランジャーポンプの例を示す。プランジャーポンプ本体吸入吐出弁10ヶ所とクランクシャフト軸受2ヶ所の計12ヶ所に振動センサーを設置し、

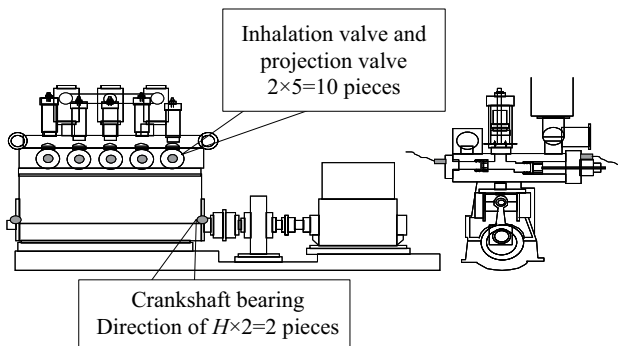
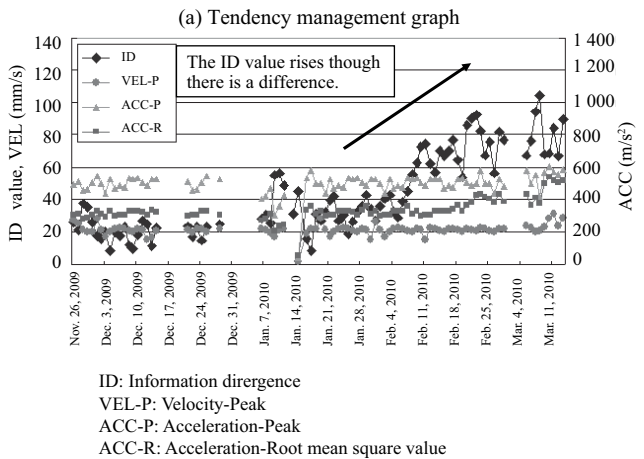


図11 厚板プランジャーポンプ本体振動センサー設置状況

Fig. 11 Vibration sensor installation situation of main body of plunger pump of plank factory



(b) Shape of waves of vibrational acceleration

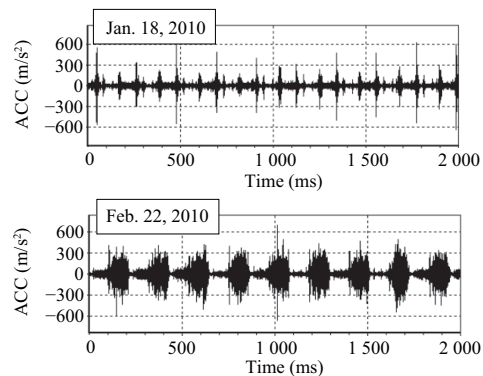


図12 吸入弁異常検出時の傾向管理グラフおよび振動加速度波形

Fig. 12 Tendency management graph and vibration acceleration wave type when inhalation valve abnormality is detected



写真2 取り外した吸入弁(シート面欠損)

Photo 2 Detached inhalation valve (loss on seat side)

ポンプの往復動異常検知を試みた(図11)。

図12は吸入弁異常検出時の傾向管理グラフおよび振動加速度波形である。従来手法である振動加速度の実効値(ACC-R)は若干の上昇はあるものの正常時の2倍弱に過ぎず、注意値に達していないため、異常判定は困難であった。それに対し、対称型カルバック情報量ID値はバラツキながらも明確な上昇傾向を示し、正常時の100倍を超えた。振動加速度波形を確認すると1月18日の時点には見られなかった弁閉後のリーク振動が2月20日になると確認されたため、定修時に弁の取替を実施した。

写真2は取り外した吸入弁の写真であるが、シート面が



大きく欠損していた。従来手法である ACC-R 値が2月20日前後からわずかな上昇をしているのに対し、統計的手法の ID 値は2月初旬から上昇しており、ID 値の優位性が確認できた。

## 5. おわりに

従来手法では異常判定が困難であったすべり軸受、往復動回転機械および低速回転機械などの実機異常判定において、主成分分析やカルバック情報量などの統計的手法により振動波形を処理することで従来よりも格段に早く、異常判定可能であることが確認できた。

なお、JFE メカニカルは本技術が組み込まれている高機能モニタリング装置「コンディション・アイ」<sup>5)</sup>の外販を開始し、すでに引き合いを戴いている。

## 参考文献

- 1) 谷口哲男, 明智吉弘. 鉄鋼設備における保守検査の最近の動向(回転機械設備の振動診断技術の動向). 検査技術, 1996-11, vol. 1, no. 1.
- 2) 豊田利夫. 機械システム診断の進め方(1998年2月). 日本プラントメンテナンス協会.
- 3) 豊田利夫. 最新設備診断技術の実用化に関する研究報告書(1999年3月). 日本プラントメンテナンス協会.
- 4) 劉信芳ほか. 対称型カルバック情報量による回転機械の異常診断. 日本設備管理学会誌. 日本設備管理学会, 1999-11, 10 3 22-27.
- 5) 高機能モニタリング装置「コンディション・アイ」. JFE 技報, 2011, no. 27, p. 58-60.



明智 吉弘



縁川 悟



小林 伸二