衝撃波を利用した擬似1次遅れ自己相関係数型劣化指標

衝撃波を利用した擬似1次遅れ自己相関係数型劣化指標

竹　安　数　博

1．はじめに

経済のグローバリゼーション化、従来の装置型産業の成熟化等により、工場新設は国内から海外進出先へというのが主流になっている。

国内では古くなった設備を設備保全しながら使ってゆかねばならず、設備保全技術は従来に増して重要となる。

大型設備を有する鉄鋼業界等では、突発的に発生する設備故障でラインが停止すると、設備の稼働率の低下、下工程への材料供給の不足、納期が切迫している受注物件の納期遅れ等、多大な影響をこうむり、また多大な損害につながる。

これらを防止するため設備異常検知は重要な役割を果たす。従来は時間基準保全（Time Based Maintenance: TBM）が主流をなしていたが、近年は設備監視のハードウェア、ソフトウェアの充実も相まって状態基準保全（Condition Based Maintenance: CBM）に大きくシフトしている。この方が部品コスト低減、保全コスト低減、故障率低減につながるからである。

保全をすると、保全後の初期故障にあたる確率が高くなる。いわゆるバスタブ曲線の初期にあたるところである。保全しなくてもすんでいたものを定期保全で保全したため初期故障を生じたりする。

CBMに移行してくると、異常の兆候をできるだけ早く捉えることがクローズアップされる。そのための手法としてさまざまなものが検討されている。分野によってその指標も異なるので、本論文では機械系の異常検知として最も普遍的なテーマである回転体の異常検知にテーマを絞って述べることにする。

従来は感度のよい指標としてKurtosis、バイコヒーレンスなどが検討されてきた[1],[2],[3],[4],[5],[6],[7]。

本論文では振動振幅を指標化するものに対象を絞り検討する。従来手法ではKurtosisは精密診断技法の一つであり、振動信号の確率密度関数の4次モーメントを正規化して計算していた。現場においては精密診断のニーズはあるもののハードウェア、ソフトウェア、コスト面から精密診断技術を組み込めないところもある。また、現場で信号波形をモニターしな

がら早急に対応が要される場合なども考えられる。

Kurtosisは感度のよい指標ではあるが、系が正常時で3.0、系の異常が進展するとそれより値が大きくなってゆくという、いわば相対指標である。一方、バイコヒーレンスは系が正常時で1.0、系の異常が進展すると0に近づいてゆく。これは一種の絶対指標であり、指標としてわかりやすいものである。バイコヒーレンスは感度のよい絶対指標ではあるが、計算が複雑である。絶対指標となるもので計算が簡便なものが求められているといえよう。

本論文では衝撃波が生起した場合の1次遅れ自己相関係数の簡易計算法を導出し、それが設備診断の良好な指標となる新しい手法を提案する。これは絶対指標となっている。電卓などでも簡易に計算でき、またマイコンチップなどにも容易に組み込めるものである。

以下、2.では各劣化指標についてサーベイし、3.で衝撃波が生じた場合の1次遅れ自己相関係数の簡易計算法を導出し数値計算を行い、他の文献等で示されたデータと比較する。4.でまとめを行う。

2. 各種劣化指標について

軸受、歯車等の回転体においては劣化が進行するに従って振動が大きくなる。また据付等が不適切な場合も振動が大きくなることは一般的によく知られている[1]。振幅の大きさは次のような指標で把握できる。計測対象から得られた振動信号を時間の関数

$$x(t)\text{, サンプリング間隔を } \Delta t$$

とし、離散データを

$$x_k = x(k\Delta t),\quad -\infty < k < \infty$$

とする。機械部品などから発生する振動を平均値0の定常確率過程とし、その確率密度関数を $p(x)$ とする。

振幅の大きさを示す指標として下記のものが周知である[4]。

$$\text{平方根値}\qquad X_{root} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} |x|^{\frac{1}{2}} p(x)\,dx\right]^{2} \tag{1}$$

$$\text{実効値}\qquad X_{rms} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} x^{2} p(x)\,dx\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

$$\text{絶対平均値}\qquad X_{abs} = \int_{-\infty}^{\infty} |x|\, p(x)\,dx \tag{3}$$

$$\text{最大値}\qquad X_{peak} = \lim_{n\to\infty}\left[\int_{-\infty}^{\infty} x^{n} p(x)\,dx\right]^{\frac{1}{n}} \tag{4}$$

これらは指標が正規化されていない有次元指標である。これらは仮に正常状態であっても機械部品などの大きさや回転数などによっても異なる。したがって汎用的に利用できる指標として正規化された無次元指標などが必要となる。正規化された無次元指標として下記のようなものが挙げられる[4],[6]。

大別して下記の4通りがある。

A．rms値を正規化するもの

B．ピーク値を正規化するもの

C．モーメントを正規化するもの

D．周波数成分間の相関を正規化するもの

それぞれについてみることにする。

A．rms値を正規化するもの

a．波形率（SF：Shape Factor）

$$SF = \frac{X_{rms}}{\bar{X}_{abs}} \tag{5}$$

（$\bar{X}_{abs}$：絶対値平均）

B．ピーク値を正規化するもの

b．波高率（CrF：Crest Factor）

$$CrF = \frac{X_{peak}}{X_{rms}} \tag{6}$$

（X_{peak}：ピーク値）

c．クリアランス率（ClF：Clearance Factor）

$$ClF = \frac{X_{peak}}{X_{root}} \tag{7}$$

d．衝撃指数（IF：Impulse Factor）

$$IF = \frac{X_{peak}}{\bar{X}_{abs}} \tag{8}$$

e．衝撃劣化指標（ID Factor：Impact Deterioration Factor）[2]

$$ID = \frac{X_{peak}}{X_c} \tag{9}$$

（X_c：振幅確率密度の曲率が最大となる振幅）

C．モーメントを正規化するもの

f．歪度（SK：Skewness）

$$SK=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}x^3p(x)\,dx}{\left[\int_{-\infty}^{\infty}x^2p(x)\,dx\right]^{\frac{3}{2}}} \tag{10}$$

g．尖り度（KT：Kurtosis）

$$KT=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}x^4p(x)\,dx}{\left[\int_{-\infty}^{\infty}x^2p(x)\,dx\right]^{2}} \tag{11}$$

D．周波数成分間の相関を正規化するもの

バイコヒーレンスは各周波数成分間の関わりあいを定量化するもので式(12)のように計算される。

$$Bic,_{xxx}(f_1,f_2)=\frac{B_{xxx}(f_1,f_2)}{\sqrt{S_{xx}(f_1)\cdot S_{xx}(f_2)\cdot S_{xx}(f_1+f_2)}} \tag{12}$$

ここで

$$B_{xxx}(f_1,f_2)=\frac{X_T(f_1)\cdot X_T(f_2)\cdot X_T^*(f_1+f_2)}{T^{\frac{3}{2}}} \tag{13}$$

：バイスペクトル

$$X_T(t)=\begin{cases}x(t) & (0<t<T)\\ 0 & (else)\end{cases}$$

T：基本周期区間

$$X_T(f)=\int_{-\infty}^{\infty}X_T(t)\,e^{-j2\pi ft}dt \tag{14}$$

$$S_{xx}(f)=\frac{1}{T}X_T(f)\,X_T^*(f) \tag{15}$$

である。

$$0<Bic,_{xxx}(f_1,f_2)<1 \tag{16}$$

であり、周波数 f_1 と f_2 との関わりあいが大きいとき、バイコヒーレンスは1に近づき、そうでないとき0に近づく。

これらの各指標は組合わせて総合的に判断されることが多い。なかでもg.尖り度(Kurtosis)は他のパラメータより有効であると報告されており[5]、関連研究も多い[2],[3],[4]。

また筆者の過去の実験結果では、バイコヒーレンスも感度のよいものであった[6],[7]。

新たに[2]でe.衝撃劣化指標がよい指標であると提案されている。

本論文では振動振幅を指標化するものに対象を絞り、衝撃波が生起した場合の1次遅れ自己相関係数の簡易計算方法を導出し、それが設備診断の良好な指標となる新しい手法を提案する。簡便で精度の高いものが導入できれば実用上大いなる効果があることが期待される。

3．1次遅れ自己相関係数の簡易計算方法について

3.1　1次遅れ自己相関係数の簡易計算方法

2.で示した振動信号を離散時間系で記述すると、信号データをサンプリングしたものとして、

$$\{x_i\} : i = 1, 2, \cdots, N$$

また、$\bar{x}$ は $\{x_i\}$ の平均を示し

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

である。2.では平均値が0と仮定していたが、以下では計算の一般化のために $\bar{x}$ を入れて考察する。

$\{x_i\}$ の分散 σ^2 は

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2$$

である。

自己相関関数は次のように定義される。

$$R_l = E[x_i x_{i+l}] = \frac{1}{N-l}\sum_{l=1}^{N-l} x_i x_{i+l} \qquad (17)$$

$$(l = 0, 1, 2, \cdots)$$

$\{x_i\}$ は定常確率過程のため、$E[x_i] = 0$ と仮定しても一般性が失われない[8]。そのため式(17)は

$$R_l = E[(x_i - \bar{x})(x_{i+l} - \bar{x})]$$
$$= \frac{1}{N-l}\sum_{i=1}^{N-l}(x_i - \bar{x})(x_{i+l} - \bar{x}) \tag{18}$$

と書き替えることができる。つまり0次の自己相関関数は分散に他ならない。

自己相関関係数は

$$\rho_l = \frac{R_l}{R_0} \tag{19}$$

と表される。

回転体に傷がついた場合などには、回転周期ごとにピーク波形が生ずる。サンプリングしたデータの m 回毎に通常の S 倍のピークをもつ信号が表されるものと仮定する。なお、サンプリング間隔の定め方についてはサンプリング定理に基づく決定方法が周知である[8]が、ここでは議論を本題テーマに絞って明確化するため単純化している。

m 回毎に通常の S 倍の信号が生ずると仮定する。また、特別なピーク（S 倍の信号）時以外の平均、分散は通常時の平均、分散と同じであると仮定する。この場合の $\{x_i\}$ の分散 $\bar{\sigma}^2$ は

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2$$
$$\simeq \frac{N - \frac{N}{m}}{N}\sigma^2 + \frac{\frac{N}{m}}{N}S^2\sigma^2$$
$$= \left(1 + \frac{S^2 - 1}{m}\sigma^2\right) \tag{20}$$

となる。$\bar{\sigma}^2$ と同様、この場合の自己相関関数を $\bar{R}_i$（$i = 0, 1, 2, \cdots$）と表記することにすると、0次の自己相関関数は分散であるから、

$$\bar{R}_0 = \bar{\sigma}^2 = \left(1 + \frac{S^2 - 1}{m}\right)\sigma^2 \tag{21}$$

を得る。次に1次遅れの自己相関関数 $\bar{R}_1$ について考える。

$$\bar{R}_1 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}x_i x_{i+1} \tag{22}$$

である。$\{x_i\}$ を並べて m 回毎に通常の S 倍の信号が生ずると、式(22)は下記の∧を付したところにピークが発生すると考えられる（個々にみるとピークにならないケースもあろうが、全体で統計的にみると差は明瞭に現れる）。

$$
\begin{array}{l}
1, 2, \cdots, m-2, m-1, m, m+1, m+2, \cdots \\
\qquad\qquad\qquad\quad \wedge \;\; \wedge \\
\qquad\qquad\qquad \cdots, 2m-1, 2m, 2m+1, \cdots \\
\qquad\qquad\qquad\qquad\quad \wedge \quad \wedge
\end{array}
$$

これをみると、

m までに1回のピーク分との積、$(m-1)$ 回の通常レベルの積

$2m$ までに3回のピーク分との積、$(2m-3)$ 回の通常レベルの積

⋮

km までに $(2k-1)$ 回のピーク分との積、$(m-2)k+1$ 回の通常レベルの積

⋮

$N-1$ までに $2\cdot\frac{N-1}{m}-1$ 回のピーク分との積、

$(m-2)\cdot\frac{N-1}{m}+1$ 回の通常レベルの積

が発生する。

通常の信号レベルに比べ、Sが大きい場合、計算を簡易化して

$$\bar{x}-\varepsilon < x_i < \bar{x}+\varepsilon$$
$$\varepsilon > 0\ ,\ (i=1,2,\cdots,N)$$

と仮定すると

$\bar{x}>0$ のとき

$$
\begin{aligned}
&\frac{1}{N-1}\left[S\left(2\cdot\frac{N-1}{m}-1\right)+\left\{(m-2)\cdot\frac{N-1}{m}+1\right\}\right](\bar{x}-\varepsilon)^2 < R_1 \\
&< \frac{1}{N-1}\left[S\left(2\cdot\frac{N-1}{m}-1\right)+\left\{(m-2)\cdot\frac{N-1}{m}+1\right\}\right](\bar{x}+\varepsilon)^2 \qquad (23)
\end{aligned}
$$

$\bar{x}<0$ のとき

$$
\begin{aligned}
&\frac{1}{N-1}\left[S\left(2\cdot\frac{N-1}{m}-1\right)+\left\{(m-2)\cdot\frac{N-1}{m}+1\right\}\right](\bar{x}-\varepsilon)^2 > R_1 \\
&> \frac{1}{N-1}\left[S\left(2\cdot\frac{N-1}{m}-1\right)+\left\{(m-2)\cdot\frac{N-1}{m}+1\right\}\right](\bar{x}+\varepsilon)^2 \qquad (24)
\end{aligned}
$$

となる。$\bar{x}\to 0$ とし $\sigma^2 \simeq \varepsilon^2$ と近似したものを仮定すると式(21)を用いて、

$$\begin{aligned}\bar{\rho}_1 &= \frac{\bar{R}_1}{\bar{R}_0} \\ &\simeq \frac{1}{N-1}\left[S\left(2\cdot\frac{N-1}{m}-1\right)+\left\{(m-2)\cdot\frac{N-1}{m}+1\right\}\right]\cdot\frac{1}{1+\frac{S^2-1}{m}} \\ &= \left\{\left(\frac{2}{m}-\frac{1}{N-1}\right)(S-1)+1\right\}\cdot\frac{m}{m+S^2-1} \qquad (25)\end{aligned}$$

を得る。これは所定の仮定の元、1次遅れの自己相関係数を近似計算したものであるため、擬似1次遅れ自己相関係数と言い換えることができる。この仮定のもとでは、系が正常である $S=1$ の時に常に $\bar{\rho}_1=1$ となる。また $N\to\infty$, $S\to\infty$ で $\bar{\rho}_1\to 0$ となる。

3.2 数値計算

いま、3.1の仮定の元で $m=12$ とする。また、3.1における S 倍のピークを $S=2,4,6,8$ の各ケースで考え、式(25)の値の変遷結果を表1に示す。

表1：ピーク値の変化による $\bar{\rho}_1$

S	1	2	4	6	8
$\bar{\rho}_1$	1.0	0.93	0.67	0.47	0.35

これからわかるように $\bar{\rho}_1$ は設備診断における劣化指標として用いることができる。これを擬似1次遅れ自己相関係数型劣化指標と呼ぶことにする。以下、この結果を多面的に検討するため、まずKurtosis、ついでバイコヒーレンスの過去の検討結果を確認する。

[2]ではシミュレータで振動波形を発生させ、(a)正常状態、(b)小さな傷が生じている状態（振幅の最大値が(a)の2倍)、(c)大きな傷が生じている状態（振幅の最大値が(a)の6倍）について、Kurtosisを正常値の比 Fa で比較している（結果は後続記述内容とあわせて表3にまとめている)。ここで

$$Fa=\frac{P_{abn}}{P_{nor}} \qquad (26)$$

P_{nor}：正常時の指標値

P_{abn}：異常時の指標値

である。

Kurtosisは系が正常時には3.0である。

筆者等はKurtosisの簡易計算方法を以前提案した。今回の諸前提に置きなおすと、

Kurtosisの簡易計算KTは

$$KT = 3.0 \times \frac{\left(1+\frac{S^4-1}{m}\right)}{\left(1+\frac{S^2-1}{m}\right)^2} \tag{27}$$

と表すことができる。これを$m=12$, $S=2,4,6$ のケースで計算すると表2のようになる。

表2：ピーク値の変化によるKT

S	2	4	6
KT	4.32	13.2	21.3

[2] の結果をあわせると表3のようになる。

表3：Faの比較

S	Fa		換算KT($Fa\times 3.0$)	
	[2]	表2	[2]	表2
2	2.82	1.44	8.46	4.32
6	6.52	7.10	19.6	21.3

$S=6$のような大きな傷の場合は近似した値となっている。$S=2$のような小さな傷が生じている場合は、筆者の過去の何回かの実験からみても、$\bar{K}T$が3.5～4.5のことが多く表2の結果は納得のできる数値である。

また邵他[3]には軸受転動体の傷の小、中、大で回転速度を変えた場合のKTを計測している。まとめて表4に示す。傷の大小の定義など必ずしも厳密に一致しているわけではないが、参考にすることができる。

表4：各ケースにおけるKT

	回転数（rpm）		
	200	500	1700
傷小	3.5～4.0[1]	3.4～3.9	2.5～3.8[1]
傷中	6～7	4.6～5.6	3.8～4.6
傷大	7～10[1]	5.7～8	4～6[1]

（注）[1]は [5] の文中表記分、他は [5] 中のグラフより読み取り分

次にバイコヒーレンスについてみてみる。筆者等が過去行った実験結果[6],[7]は、概略次のようなものである。

小型減速機の歯車の歯面に次のようなピッチング傷を印加し、各々傷小レベル、中レベル、大レベルとした。

傷小レベル：第二段歯車の総歯数の内、約1/3に印加

傷中レベル：第二段歯車の総歯数の内、約2/3に印加

傷大レベル：第二段歯車の総歯数の内、全部に印加

式(12)における f_1 と f_2 については、何種類かの組み合わせで検討したが

$$\begin{cases} f_1 : \text{固有振動の内、パワースペクトル値が最大となる周波数} \\ f_2 : 2f_1 \end{cases}$$

とした時に最もよい結果を得た。その時のバイコヒーレンスの推移結果を表5に示す。

表5：バイコヒーレンスの推移

状　態	正常時	傷小	傷中	傷大
バイコヒーレンス	0.99	0.38	0.09	0.02

このようにバイコヒーレンスは極めて感度のよい指標であることがわかった。なお、先ほどのと同様、実験対象設備や傷の大小の定義など必ずしも厳密に一致しているわけではないが、参考にすることができる。

バイコヒーレンスは式(16)に示すように0と1との間で示される絶対指標である点、普遍性が高いといえる。

さて、これらと今回の擬似1次遅れ自己相関係数型劣化指標とを比較する。明らかに今回の手法はバイコヒーレンスのように0と1との間の値をとる絶対指標である。感度はバイコヒーレンスほど敏感ではないが、傷が大レベルであると0.5以下になり、傷が中レベルであると0.67、傷小レベルで0.93となると、ある程度実態を表すものとして感覚的にわかりやすいとも言える。何より本手法は式(25)に示されるように電卓ででも簡便に計算できる点が特徴である。簡便で実用的であるため、式(12)～(15)などを計算しなければならないバイコヒーレンスに比べ、現場において格段に扱いやすいものといえる。

また、Kurtosisについては、系が正常の場合、その値が3.0で、系の異常が進展すると表2～4に示すように値が大きくなってゆく。そのため直接比較はできないがバイコヒーレンスとKurtosisを併用しながら総合的に判断するような活用の仕方が考えられる。Kurtosis

についても筆者等は式(27)に示す簡易計算方法を提出し、その実用性も検証しているので、双方とも同様に簡便に算出して総合的判断に供することができる。

3.3　考察

衝撃波が生じた場合の１次遅れ自己相関係数の簡易計算法を導出し、それが設備診断の良好な指標となることを示した。それを擬似１次遅れ自己相関係数型劣化指標と名付け、バイコヒーレンスやKurtosisとの比較を行った。この新しい劣化指標は過去の文献データと比較してほぼ妥当な数値となっている。

この方法による異常検知のステップは次のようになる。

1．正常・異常各レベルの $\bar{\rho}_1$ の標準テーブルをあらかじめ準備しておく。

2．信号データより、ピーク値を計測し、正常データ時におけるピーク値の比をとる。

3．式(25)より $\bar{\rho}_1$ を計算する。

4．$\bar{\rho}_1$ により異常レベルを判定する。

上記の標準テーブルは判断の基準となるものなので簡易計算でなく、元の式(19)で計算したもので準備しておくことが望ましい。$\bar{\rho}_1$ は無次元指標であるため、基本的には設備の大きさや回転数に依存しないと考えられるが、現実には回転数による多少の違いもある。マクロでみれば $\bar{\rho}_1$ の水準で異常の大小は判断できるが、詳細に見る場合は設備に応じた標準テーブルを準備しておくほうが該当設備に密着した感度のよい判断が可能となると考えられる。

このように正常・異常各レベルの $\bar{\rho}_1$ の標準テーブルをあらかじめ準備しておけば、ピーク値を計測し正常データ時における比をとるだけで式(25)から簡単に $\bar{\rho}_1$ を計算することができ、容易に異常レベルを判定することができる。

この計算は電卓ででもできる簡便なもので、現場における保全において重装備を必要とせず、実用度の高いものである。またマイコンチップなどに組み込み、異常の早期発見ツールとしても活用することができる。

4．おわりに

衝撃波が生じた場合の１次遅れ自己相関係数の簡易計算法を導出し、それが設備診断の良好な指標となることを示した。それを擬似１次遅れ自己相関係数型劣化指標と名付け、バイコヒーレンスやKurtosisとの比較を行った。この新しい劣化指標は過去の文献データと比較してほぼ妥当な数値となっている。

これは絶対指標となっているので、わかり易く現場でも使い勝手のよいものと言える。この方法は電卓ででも計算できるほどの簡便なもので、現場での活用において非常に実用度の高いものである。また、マイコンチップなどに組み込み異常の早期発見ツールとしても活用することができる。

今後、本手法を実機に適用したケースを重ね、さらに精度の向上を図ってゆきたく考えている。

参考文献

[1] 山崎弘郎：異常検知と予知，工業調査会，(1988)

[2] 前川健二，中島智，豊田利夫：衝撃振動を利用した機械部品の劣化度評価方法，日本設備管理学会誌，pp. 163-168，Vol. 9，No. 3，(1997)

[3] 邵毅敏，根津紀久雄，松浦勉，長谷川祐樹，寒澤則明：適応フィルタを用いたベアリングの故障診断，日本設備管理学会誌，pp. 71-77，Vol. 12，No. 3，(2001)

[4] 宋京偉，陳鵬，豊田利夫：逐次ファジィ・ニューラルネットワークを用いた歯車装置の異常診断，日本設備管理学会誌，pp. 15-20，Vol. 10，No. 1，(1998)

[5] 野田万朶：転がり軸受の異常診断，NSK Tec. J.，pp. 33-38，No. 647，(1987)

[6] 竹安数博：周期運動体の監視方法，特公昭 62-60011，(1987)

[7] 竹安数博：周期運動体の監視方法，特公昭 64-4611，(1989)

[8] 得丸英勝，添田喬，中溝高好，秋月影雄：計数・測定，培風館，(1982)