衝撃波を利用した改訂 Kurtosis 法

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2009-08-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 竹安, 数博 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00001278

衝撃波を利用した改訂Kurtosis法

竹　安　数　博

1．はじめに

経済のグローバリゼーションが進展するなかで、新工場建設というニュースは殆ど海外進出先でというのが多数を占めるようになっている。

国内では技術開発にからむ試作品や特殊仕様品、短納期品など、海外ではハンドリングするのが難しいものの製造が残るようになってきている。加えて新工場等の設備投資があまりなされなくなると設備保全の重要性が従来以上に増してきていると言える。減価償却費の範囲内で設備更新投資というシンプルな構図となりにくくなりつつある。そういったトレンドの中で、設備異常検知は設備保全の中で鍵となる重要な技術であると位置付けられる。

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。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。これを現場では“当たりこわし”と呼んでいるところもある。

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, Bicoherence, 衝撃劣化指標（Impact Deterioration Factor: ID Factor）などが検討されてきた[1],[4],[5],[6],[8],[9]。

本論文では振動振幅を指標化するものに対象を絞り、Kurtosisについて検討する。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。

本論文では特に初期異常検知にフォーカスした簡易計算方法を導出し、電卓等ででも簡便にKurtosisが計算でき、またマイコンチップ等にも容易に組み込めるものを提案する。

以下、2．では各劣化指標についてサーベイし、3．でKurtosisの簡易計算方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

$$x_k = x(k\Delta t)\text{ , } -\infty < k < \infty$$

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]。

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

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

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

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

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）

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

（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[7]、関連研究も多い[4],[5],[6]。

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[8],[9]。

新たに[4]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、特に初期異常検知にフォーカスしたKurtosisの簡易計算方法を導入・提案する。また衝撃劣化指標の応用拡張についても同様に検討し、簡易計算方法を導入・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．Kurtosisの簡易計算方法について

3.1　Kurtosisについて

2.1で示したKT (Kurtosis) を離散時間系で記述すると次のようになる。

$$KT=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}x^4p(x)\,dx}{\left[\int_{-\infty}^{\infty}x^2p(x)\,dx\right]^2}=\lim_{N\to\infty}\frac{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^4}{\left\{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2\right\}^2} \tag{17}$$

ここで

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

は信号データをサンプリングしたものである。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.では平均値をゼロと仮定していたが、以下ではデータの層別計算を行うため$\bar{x}$を入れて考察する。直近までにN個のデータが入手されており、そのあとさらにl個のデータが得られたケースを考える。N個のデータでKTを計算したものをKT_Nと表記することにする。いま

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

と仮定するとKT_{N+l}は

$$KT_{N+l}=\frac{\dfrac{1}{N+l-1}\sum_{i=1}^{N+l}(x_i-\bar{x})^4}{\left\{\dfrac{1}{N+l-1}\sum_{i=1}^{N+l}(x_i-\bar{x})^2\right\}^2}$$
$$=\frac{\dfrac{N-1}{N+l-1}\cdot\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^4+\dfrac{l-1}{N+l-1}\cdot\dfrac{1}{l-1}\sum_{i=N+1}^{N+l}(x_i-\bar{x})^4}{\left\{\dfrac{N-1}{N+l-1}\cdot\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2+\dfrac{l-1}{N+l-1}\cdot\dfrac{1}{l-1}\sum_{i=N+1}^{N+l}(x_i-\bar{x})^2\right\}^2} \tag{18}$$

となる。N個までのデータにおける分散、平均、KTを

$$\sigma_N^2,\ \bar{x}_N,\ KT_N$$

とし、$N+1\sim N+l$についての各項目をそれぞれ

$$\sigma_{N/l}^2,\ \bar{x}_{N/l},\ KT_{N/l}$$

と表記することにする。

また

$$\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^4 \quad \text{を} \quad M_N$$
$$\frac{1}{l-1}\sum_{i=N+1}^{N+l}(x_i-\bar{x})^4 \quad \text{を} \quad M_{N/l}$$

と表記することにする。

［ケース１］

データが1～N個までと、特別なピーク値等の発生を除き、1～$N+l$個までの平均、分散が同じの場合

仮定より

$$\bar{x}_N=\bar{x}_{N+l}$$
$$\sigma_N^2=\sigma_{N+l}^2$$

である。式(18)より

$$KT_{N+l}=\frac{N-1}{N+l-1}KT_N+\frac{l-1}{N+l-1}KT_{N/l} \tag{19}$$

を得る。

［ケース２］

データが１～N個までと、特別なピーク値等の発生を除き、１～$N+l$個までの平均は同じだが、分散が異なる場合

仮定より $\bar{x}_{N+l}$ は

$$\bar{x}_N=\bar{x}_{N+l}$$

である。また $\sigma^2_{N/l}$ は

$$\sigma^2_{N/l}=\sigma^2_N+\delta\sigma^2_N$$

で表わされるものとする。式(18)より

$$\begin{aligned}
KT_{N+l}&=\frac{\dfrac{N-1}{N+l-1}M_N+\dfrac{l-1}{N+l-1}M_{N/l}}{\left(\dfrac{N-1}{N+l-1}\sigma^2_N+\dfrac{l-1}{N+l-1}\sigma^2_{N/l}\right)^2}\\
&\simeq\frac{\dfrac{N-1}{N+l-1}M_N+\dfrac{l-1}{N+l-1}M_{N/l}}{\sigma^4_N}\\
&\quad\cdot\left(1-2\cdot\frac{l-1}{N+l-1}\frac{1}{\sigma^2_N}\delta\sigma^2_N\right)\\
&=\frac{N-1}{N+l-1}KT_N\left(1-2\cdot\frac{l-1}{N+l-1}\frac{\delta\sigma^2_N}{\sigma^2_N}\right)\\
&\quad+\frac{l-1}{N+l-1}\frac{M_{N/l}}{\sigma^4_N}
\end{aligned}\tag{20}$$

を得る。

3.2　Kurtosisの簡易計算方法

回転体に傷がついた場合などには、回転周期ごとのピーク波形が生ずる。特に初期異常の場合、当該回転体や転動体の単独の損傷が他の回転体や転動体に派生的に影響を伝播しない間は、このピークが明確に出るものと想定される（通常、回転体や転動体の損傷が生ずると、その接触面を損傷させることにより経時的に他の回転体や転動体への損傷に広がってゆくケースが多い)。

サンプリングしたデータのm回転に通常のS倍のピークを持つ信号が現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[10]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。

また3.1［ケース１］でかつ、ピーク発生部分を除き、４次モーメントが同じである場合

を仮定する。

この場合のデータが $N+1 \sim N+l$ の $\sigma^2_{N/l}$ を $\bar{\sigma}^2_{N/l}$，$M_{N/l}$ を $\bar{M}_{N/l}$ と表すと

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}^2_{N/l} &= \frac{1}{l-1}\sum_{i=N+1}^{N+l}(x_i-\bar{x})^2 \\ &= \frac{l-1-\frac{l}{m}}{l-1}\sigma^2_N + \frac{\frac{l}{m}}{l-1}S^2\sigma^2_N \\ &\simeq \sigma^2_N\left(1+\frac{S^2-1}{m}\right) \qquad (21)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{M}_{N/l} &= \frac{1}{l-1}\sum_{i=N+1}^{N+l}(x_i-\bar{x})^4 \\ &= \frac{l-1-\frac{l}{m}}{l-1}M_{N/l} + \frac{\frac{l}{m}}{l-1}S^4 M_{N/l} \\ &\simeq \left(1+\frac{S^4-1}{m}\right)M_{N/l} \qquad (22)\end{aligned}$$

を得る。これらより上記のケースの KT_{N+l} を $\bar{KT}_{N+l}$ と表すと

$$\begin{aligned}\bar{KT}_{N+l} &= \frac{\frac{N-1}{N+l-1}M_N + \frac{l-1}{N+l-1}\left(1+\frac{S^4-1}{m}\right)M_{N/l}}{\left\{\frac{N-1}{N+l-1}\sigma^2_N + \frac{l-1}{N+l-1}\sigma^2_N\left(1+\frac{S^2-1}{m}\right)\right\}^2} \\ &\simeq KT_N\frac{\left(1+\frac{l-1}{N+l-1}\,\frac{S^4-1}{m}\right)}{\left(1+\frac{l-1}{N+l-1}\,\frac{S^2-1}{m}\right)^2} \qquad (23)\end{aligned}$$

となる。以下これを衝撃波発生時の改訂Kurtosis法と呼ぶことにする。

3.3 数値計算

系が正常のとき、$p(x)$ は正規分布としてよい。正規分布の場合、理論計算により KT は常に

$$KT=3.0$$

である。

いま、3.2の仮定で $m=12$ とする。また、3.2における S 倍のピークを $S=2,3,\cdots,6$ のケースを考え、$l=N/10$ とした場合の式(23)の値の変遷結果を表1に示す。ここで N は特定しなくても系が正常として $KT_N=3.0$ とおくと、式(23)より $\bar{KT}_{N+l}$ の計算は可能である

表1：ピーク値の変化による$\bar{KT}_{N+l}$の変遷（$l=N/10$）

S	$\bar{KT}_{N+l}$
2	3.19
3	4.28
4	7.09
5	12.3
6	20.3

表2：ピーク値の変化による$\bar{KT}$の変遷（$l=N$）

S	$\bar{KT}_{N+l}$
2	4.32
3	8.28
4	13.2
5	17.7
6	21.3

が、一般には1000、3000、5000、10000等の範囲のデータを用いることが多い。現実的には有限個のデータ数では $KT\simeq 3.0$ であり、一般的にNが大きくなればなるほど3.0に近づくと言える。

つぎに初期正常データ分Nを0、新規に追加で得られたl個のデータ数をNとして同様に計算したものを表2に示す。

[4] 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)について各指標値を正常値の比Faで比較している。

ここで

$$Fa=\frac{P_{abn}}{P_{nor}} \tag{24}$$

P_{nor}：正常時の指標値

P_{abn}：異常時の指標値

である。

KTは正常時は3.0であるから、表2の該当値を3.0で割り、比較結果を表3に示す。

表3：Faの比較

S	Fa		換算KT($Fa\times3.0$)	
	[4]	表2	[4]	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[5]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。

表4：各ケースにおけるKT

	回転数（rpm）		
	200	500	1700
傷小	3.5～4.0*⁰	3.4～3.9	2.5～3.8*⁰
傷中	6～7	4.6～5.6	3.8～4.6
傷大	7～10*⁰	5.7～8	4～6*⁰

（注）*⁰は[5]の文中表記分、他は[5]中のグラフより読み取り分

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。

ここで表1のように $l=N/10$ とした場合（ケースa）と表2のように初期正常データ分Nを0、新規に追加で得られたデータ数をNとした場合（ケースb）について運用上の相違について述べておく。

ケースbの方が異常データのみを取り扱っているために異常度を示す指標値も明瞭に現れやすい。ところが連続監視時においては、データは通常、正常時のデータの重みづきのケースaのような動きをとることが予想される。ケースaの状況で監視し、初期異常の徴候が現われたらケースbで計算してみるといった運用方法が考えられる。

3.4　考察

（1）数値計算結果に関する考察

感度の良い良好な異常検知指標の一つであるKurtosisに対して簡易計算方法を導入した。

N個の正常時のデータからl個の初期異常時のデータが入ったときのKTの動きなどが簡易に計算できる。この簡易計算値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KT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(23)よりKTを計測する。

4．KT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(18)で計算したもので準備しておくことが望ましい。Kurtosis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ものといわれているが、現実には表4にみられるように回転数による多少の違いもある。マクロでみれば、Kurtosis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KT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(23)から簡単にKT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。

（2）Kurtosisからの衝撃波のピーク倍数の推定

Kurtosisが算出されている場合、衝撃波のピークのレベル（正常時の何倍程度か）について、式(23)より逆に算出できる。常時監視している対象設備に付帯設置したマイコン等でKurtosisのみ算出し、データを中央監視室や保全員待機室などに送り、ディスプレイに表示しているような場合も考えられる。こういう場合では、通常の精密診断を行うときと逆のような上記のような手順が必要となる場合も起こりうる。

系が異常であるとし、$N=0$，$l=N$とする。式(23)より

$$\bar{KT}_{0+N} \simeq KT_0 \frac{\left(1+\dfrac{S^4-1}{m}\right)}{\left(1+\dfrac{S^2-1}{m}\right)^2} \tag{25}$$

を得る。ここで $KT_0=3.0$ である。

$$\alpha=\frac{KT_0}{\bar{KT}_{0+N}} \tag{26}$$

とおくと、Sは

$$S\simeq\sqrt{\frac{m-1+\sqrt{(m-1)^2+(m\alpha-1)(m-1)\{m(1-\alpha)-1\}}}{m\alpha-1}} \tag{27}$$

で得られる。

（3）初期異常からの異常進展判断に関する考察

3.2、3.3で議論を本題テーマに絞って明確化するため、m回毎に通常のS倍のピークを持つ信号が現われるものと仮定した。しかし、現実には系の異常が進展するとその高周波に相当するピークも生じてきたり、他の転動体にも損傷が広がるため、当初のm回毎にピークが生ずるか、同一時間間隔でもっと多頻度にピークが生じてくる。このことは今まで計算した内容をもとにmを推定すると、もし系の異常が進展している場合、初期的に想定されるmよりも小さなmが推定されることを示唆する。

以下この検討を数式計算に基づき行う。

Kurtosisの簡易計算法である、式(23)をさらに近似すると

$$\begin{aligned}\bar{KT}_{N+l}&\simeq KT_N\left(1+\frac{l-1}{N+l-1}\cdot\frac{S^4-1}{m}\right)\left(1-2\frac{l-1}{N+l-1}\cdot\frac{S^2-1}{m}\right)\\&\simeq KT_N\left(1+\frac{l-1}{N+l-1}\cdot\frac{S^4-1}{m}-2\frac{l-1}{N+l-1}\cdot\frac{S^2-1}{m}\right)\\&=KT_N\left\{1+\frac{l-1}{N+l-1}\cdot\frac{(S^2-1)^2}{m}\right\}\end{aligned} \tag{28}$$

となる。よって、$\bar{KT}_{N+l}$ の増分を $\Delta\bar{KT}_{N+l}$ とすると

$$\frac{\Delta\bar{KT}_{N+l}}{\bar{KT}_N}=\frac{l-1}{N+l-1}\cdot\frac{(S^2-1)^2}{m} \tag{29}$$

を得る。

一方、分散について言えば

$$\bar{\sigma}_{N+l}^2=\frac{N-1}{N+l-1}\sigma_N^2+\frac{l-1}{N+l-1}\sigma_N^2\left(1+\frac{S^2-1}{m}\right)$$
$$\simeq\sigma_N^2+\frac{l-1}{N+l-1}\sigma_N^2\frac{S^2-1}{m} \tag{30}$$

となる。よって増分比は同様にして

$$\frac{\Delta\bar{\sigma}_{N+l}^2}{\bar{\sigma}_N^2}=\frac{l-1}{N+l-1}\cdot\frac{S^2-1}{m} \tag{31}$$

を得る。ここで $(\Delta\bar{KT}_{N+l}/\Delta\bar{KT}_N)/(\Delta\bar{\sigma}_{N+l}^2/\sigma_N^2)^2$ を求めてみると

$$\Delta\xi=\frac{\dfrac{\Delta\bar{KT}_{N+l}}{KT_{N+l}}}{\left(\dfrac{\Delta\bar{\sigma}_{N+l}^2}{\sigma_N^2}\right)^2}=\frac{N+l-1}{l-1}\cdot m \tag{32}$$

を得る。

初期のNを0，lをN，m回毎にピークが発生とした場合

$$\Delta\xi=m \tag{33}$$

初期のNを0，lをN，系の異常が進展し、$m/2$回毎にピークが発生とした場合

$$\Delta\xi=\frac{2}{m} \tag{33}$$

となり、推定されたmが当初の値よりも小さくなってきて、系の異常進行度合いがわかる。なおこれは、式(29)からだけでもわからないことはないが、式(32)を観測する利点はこの他にも次のようなことが挙げられる。すなわち式(32)はmの関数となっており、l個の追加分が満辺なく振巾増加しているか（ケースｉ）、m周期分ごとに増加することにより、Kurtosis分も増加さているか（ケースii）を推測することが可能となる。

l個のデータが追加され、分散、Kurtosisともに増加したとしても、その増加分のずれにより、式(32)の計算結果がmの関数でない場合はケースｉの方であると考えられる。もっともこれはパワースペクトルをみれば分かることかもしれないが、スペクトルアナライザーを手元で活用することができない場合等に、簡便にその判断に供することができる。

4．おわりに

機械系の回転体の異常検知において良好な指標とされるKurtosisについて簡易計算方法を導出・提案した。過去の文献データなどと比較し類似の計算結果が得られた。簡易計算方法として妥当な結果が出ており、この衝撃波発生時の改訂Kurtosis法は特に初期異常検知に有効であると考えられる。

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。

今回は衝撃波発生時のKurtosisの簡易計算方法を導出したが、一般的にみると、より高次モーメントの方がさらに感度のよいことが想定される。それらの検討は今後の課題である。また、正規化されたモーメントは系の異常が進展するにつれ値が大きくなってゆく。一方、バイコヒーレンスは正常時が1で系の異常が進展してゆけば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。上記正規化モーメントの絶対指標化の工夫も今後の課題と言える。

今後はそれらのテーマについて具体的な成果が上がるよう検討してゆく予定である。

最後に日頃研究会等で貴重なアドバイスをいただいている東京都立科学技術大学　雨宮孝 教授に深く感謝申し上げる。

参考文献

[1] 山崎弘郎：異常検知と予知，工業調査会，(1988)

[2] 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，(1977)

[3] 保江邦央：ヒルベルト空間，日本評論社，(2000)

[4] 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)

[5] 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)

[6] 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)

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

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

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

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