

## 基礎からの周波数分析（38）－「回転変動計測」

これまで、回転体の音振動計測手法としてよく使われる「トラッキング解析」や、回転体の振動対策で重要となる「バランス計測」についてお話しましたが、今回のテーマは、「**回転変動計測**」です。回転体の回転変動は、負荷変動やトルク変動など様々な要因がありますが、ここでは、トラッキング解析技術を使って**ねじり振動**現象での回転変動を計測します。そしてそれから角変位変動成分を算出する例を紹介します。



図1 いろいろなタイプの小野測器製回転検出器

回転速度情報を得るためには回転センサが必要で、例えば図 1 のようにいろいろなタイプの回転検出器があります。ここでは[MP-900/9000 シリーズ 電磁式回転検出器](#)を使います。

その検出原理は、図 2 にあるように回転軸に取り付けた歯車（磁性体）に電磁式回転検出器を近接させ（約 0.5～1 mm 程度）、検出器の先端が歯車の歯先に近づいたり離れたりすることで**磁気抵抗**の変化が生じ内部のコイルに**誘導起電力**が発生してそれを出力します。いわば、発電機の原理で交流電圧が発生しますので、正弦波状の時間波形が出力され回転速度が上がればその周波数が大きくなりまたその振幅も大きくなります。この例（図 2）では検出器の出力を[TM-3100 シリーズ デジタル回転計](#)に入力して回転速度（単位：r/min）を表示しています。

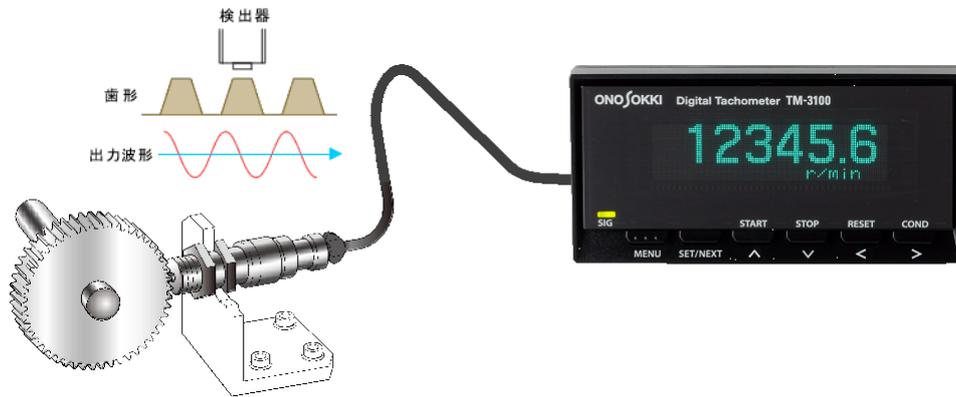


図2 MP-9000 電磁式回転検出器と TM-3100 デジタル回転計

図2にあるようなデジタル回転計は、平均的な回転速度を計測することができますが、回転変動成分（回転速度の変化量）を求めるためには、[高速FVコンバータ](#)により回転速度情報を電圧時間信号に変換してそれを周波数分析器（FFTアナライザ）で分析する手法がよく使われます。図3の例では、回転センサとして[ロータリエンコーダ](#)を使っていますが、本手法により、回転変動成分を計測しています。

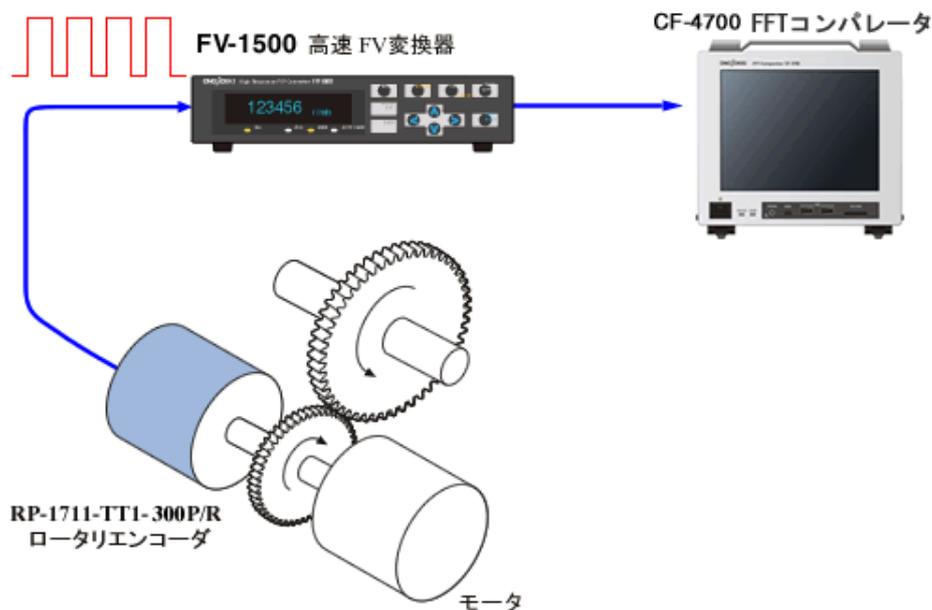


図3 高速 FV コンバータと FFT アナライザを使った回転変動計測例

高速 FV コンバータ（以下 FV-1500 と呼ぶ）に入力する信号は正弦波状の交流信号でもパルス信号（図3でのロータリエンコーダの出力）でもどちらでもよく、正弦波状の信号は入力段でパルス信号に変換して演算処理しますので、ここではパルス信号入力として以下説明します。

回転速度は、パルス信号（回転検出器からの信号）の周波数に比例することになりますから、FV-1500 は、パルス信号の 1 周期の逆数（すなわち瞬時の周波数）に対応した電圧信号をパルス信号が入るたびに出力します。図 4 に例を示すように、入力された信号の周波数に比例した電圧信号が出力されていることが分かります。

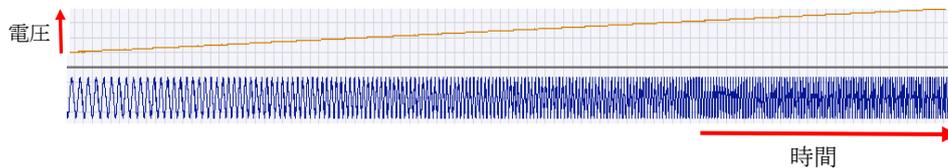


図4 スイープさせた正弦波の出力結果

上図:FV-1500 の出力電圧波形

下図:入力信号(10 Hz から 40 Hz を 10s でスイープ)

もう 1 つの例として、一定の周波数 (5 kHz) の正弦波 (搬送波) を 50 Hz の信号波で周波数変調 (FM) した信号を FV-1500 で電圧信号に変換したものが下図 (図 5) です。

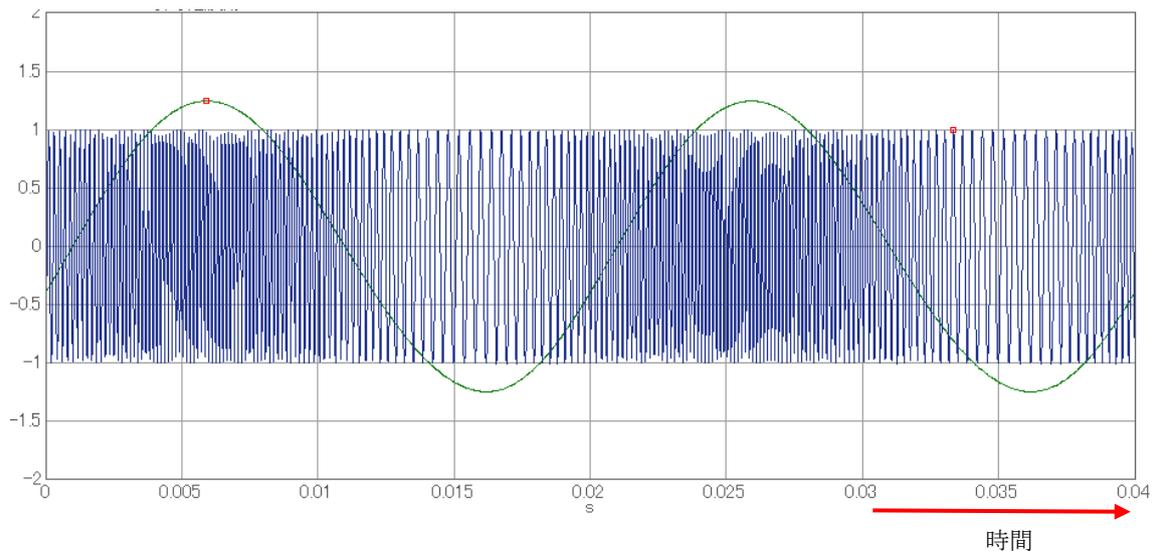


図 5 周波数変調した信号を高速 FV 変換した例

(元の FM 波: 5 kHz、信号波: 50 Hz)

一定回転速度で回転している回転体が回転変動を起こしているとするれば、物理的には周波数変調と同じ現象となりますから、回転速度情報を高速 FV 変換すれば、回転変動成分を抽出する事ができます。

この高速 FV 変換器 FV-1500 を使って回転変動計測を行うときの注意点を述べます。この機器の演算手法は、1 パルス毎にアナログ信号を出力しているから、等価的に変調信号 (回転変動成分) を入力パルスでサンプルして (数値化して) それをアナログ出力していることとなります。それ故、入力のパルス周波数が 1 回転あたりの回転変動周波数よりも大きくなければならない、すなわち、1 回転 N サンプル出力される回転検出器を使う必要があります。1 P/R の回転検出器では、回転変動成分を検出できないと言うことです。

例えば、60 P/R の回転検出器を使えば、**サンプリング定理**から原理的に回転30次成分(1/2)までの回転変動成分を求めることができますこととなりますが、波形の歪み、折返し誤差、D/A 変換器の**0次ホールド**誤差などがあり、現実的には、6次成分(1/10)ほどが実用的となります。

ここで、回転体の回転速度と**角速度**との関係について考えます。通常回転速度といえば、1分間に回転する回数で、その単位は  $m^{-1}$  あるいは  $r/min$  です。また、1秒間に回転する回数は回転周波数で、その単位は、 $s^{-1}$  あるいは  $Hz$  です。それに対して角速度 (**角周波数**) は1秒間に角度でどれくらい回転するか (何ラジアン回転するか) を表す量で、その単位は  $rad/s$  です。いま、回転速度を  $n$ 、周波数を  $f$ 、角速度を  $\omega$  とすると、1回転の角度は  $2\pi$  (360度) ですから

$$f = \frac{n}{60} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{60} n \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係となります。例えば、回転速度が 1000 ( $r/min$ ) であれば、角速度は、約 105 ( $rad/s$ ) です。

これらの予備知識を踏まえ、図 6 にある回転デモ装置を使い、回転速度をスイープさせて、**ねじり振動** に起因する回転変動成分を計測してみます。この装置の回転軸には 60 P/R の歯車がついており、電磁式回転検出器で回転速度情報を検出し、FV-1500 によりアナログ電圧信号に高速変換して、それを FFT アナライザに入力して、トラッキング解析を実行します。なお、回転トラッキング解析に必要な外部サンプルパルス信 (1 P/R) は、別のセンサから検出しています。

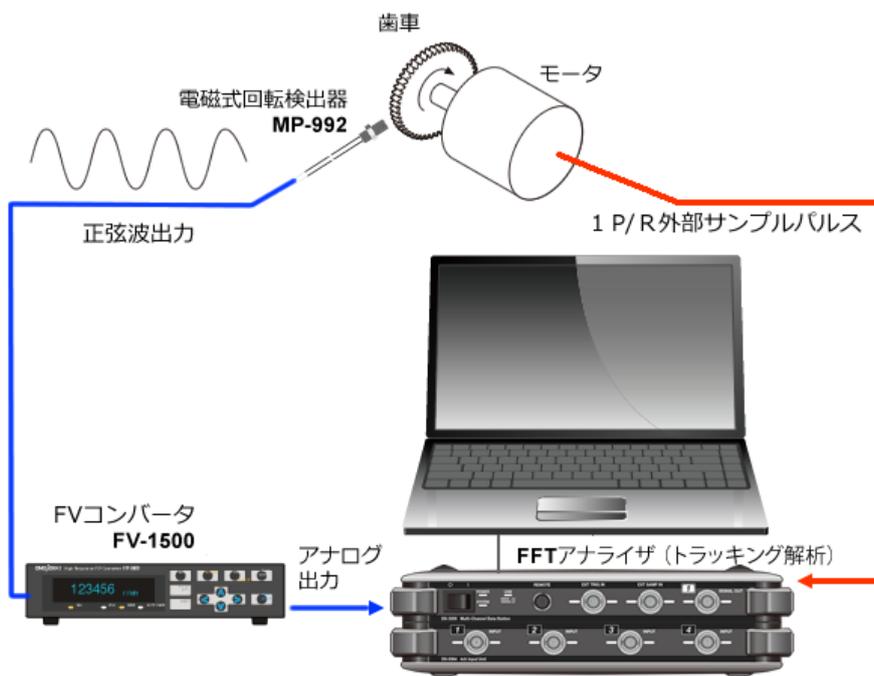


図6 電磁式回転検出器と高速 FV コンバータを使った回転変動計測

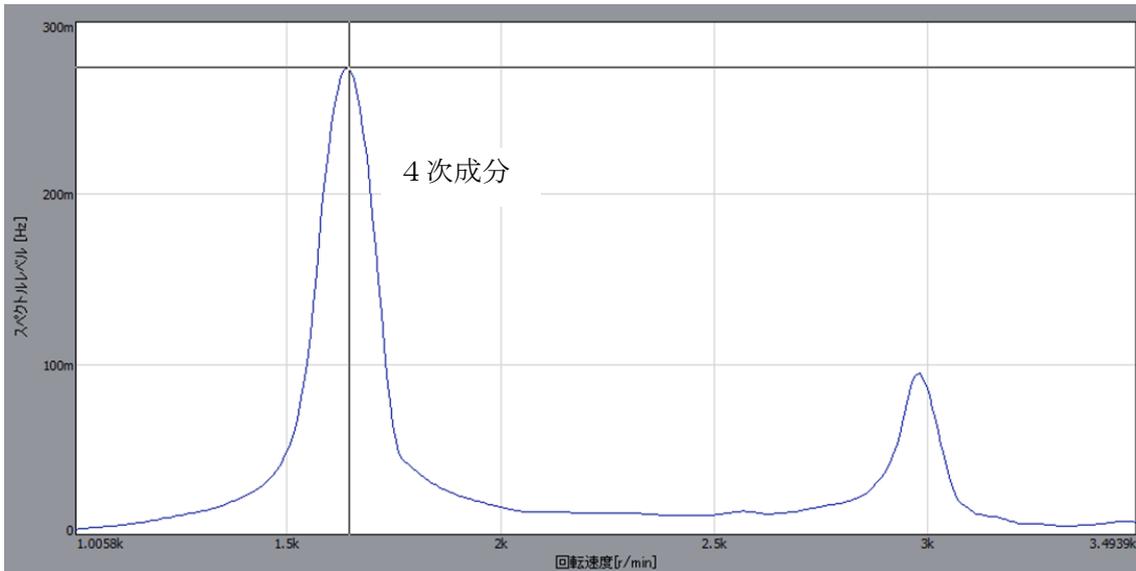


図7 周波数変動成分(4次)の定比トラッキング解析結果  
スweep範囲 : 1000 ~ 3500 r/min

図7は、その計測結果です。4次成分のトラッキング線図(横軸:回転速度、縦軸:周波数)で、約1643 r/min付近でねじり振動の共振により大きく回転変動していることが分かります。

周波数変動振幅 : 273.4 (mHz)  
角速度変動振幅 : 1.718 (rad/s)  
回転速度変動振幅 : 16.40 (r/min)

この結果から、角変位変動振幅を求めることにします。  
ここで、周波数変調の考え方を説明します。

以下で、 $x(t)$ は周波数変調された時間信号

$\omega(t)$ はその角速度、 $\omega(s)$ は変動成分の角速度、 $a_m$ は変動成分の角速度変動量

$$x(t) = A \sin(\theta(t))$$

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \theta(t) = \omega_c + a_m \cos(\omega_s t)$$

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt = \omega_c t + \frac{a_m}{\omega_s} \sin(\omega_s t)$$

$\omega_c$  : 中心角速度

$\omega_s$  : 変動成分の角速度

$a_m$  : 角速度変動量

これらの関係式から、角変位変動量は、角速度変動量を変動成分の角速度で割ることにより求めることができます。具体的な計算方法は、FFTアナライザの1機能である周波数微積分機能(j $\omega$ 演算)を使います。

図 8 が、その計算結果です。

縦軸は角度相当となっておりますが、rad (弧度法) ベースとなっております、度 (度数法) の角度にするためには、360 倍すれば良いことになります。具体的には

角変位変動成分の振幅：  $397.3 \mu \times 360 = 0.14 \text{ deg}$  (1643 r/min にて)  
となります。

今回の計測例では、電磁式回転検出器と高速FVコンバータを使用しましたが、回転デモ装置についている円盤の接線方向の速度 $v$ をレーザー面内速度計で計測すれば、 $v = r\omega$  ( $r$ は円盤の半径) の関係から角速度  $\omega$  を直接検出することも可能です。

次回は、2 ch を使って、ねじり振動計測の説明をします。

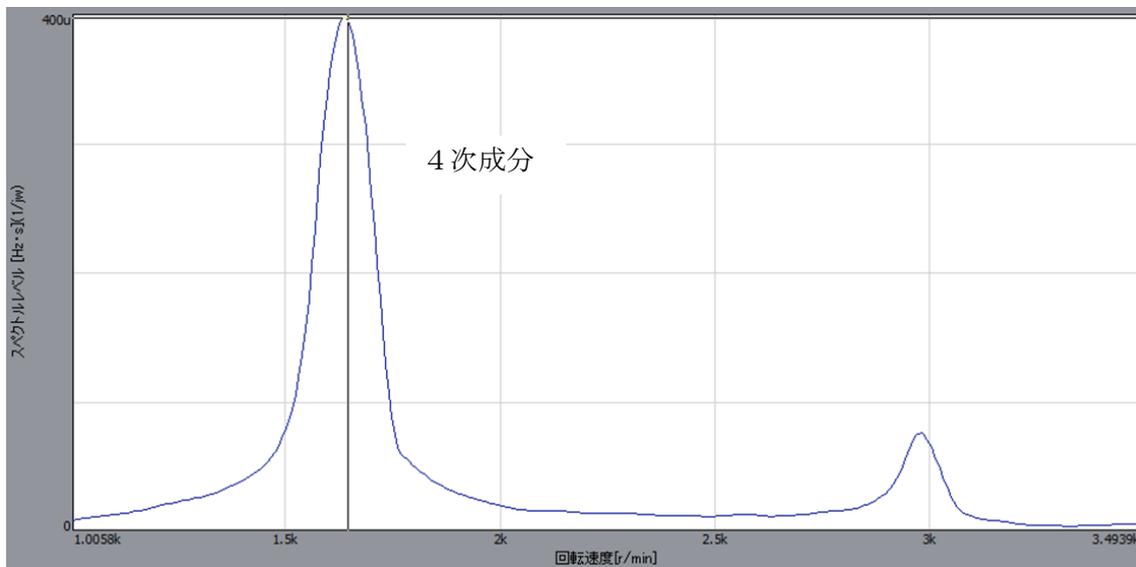


図 8 角変位変動成分(4次)の定比トラッキング解析結果

図 7 の結果を周波数軸 1 重積分したもの

最後にまとめです。

- (1) 回転体の回転情報を検出する回転センサは、様々なタイプがありますが、電磁式回転検出器が使いやすく比較的安価でよく利用されています。
- (2) 電磁式回転検出器からの回転パルスを高速 FV コンバータにより回転速度 (あるいは角速度) 変動成分のアナログ信号に変換して FFT アナライザで分析する手法がよく用いられます。
- (3) 回転体のねじり共振による回転変動は、高速 FV コンバータの出力をトラッキング解析により求めることができます。
- (4) 回転速度 (あるいは角速度) 変動成分の検出は、回転検出器+高速 FV コンバータの方法だけでなく、レーザー面内速度計でも検出可能です。

**【キーワード】**

トラッキング解析、バランスング計測、回転変動計測、ねじり振動、電磁式回転検出器、磁気抵抗、誘導起電力、デジタル回転計、回転速度、高速 FV コンバータ、ロータリエンコーダ、搬送波、周波数変調、サンプリング定理、折り返し、0 次ホールド、角速度、角周波数、トラッキング線図、周波数微積分、レーザ面内速度計

(Hima)