

次数比分析とトラッキング解析

改訂：2012/01/17

株式会社 小野測器

次数比分析とトラッキング解析

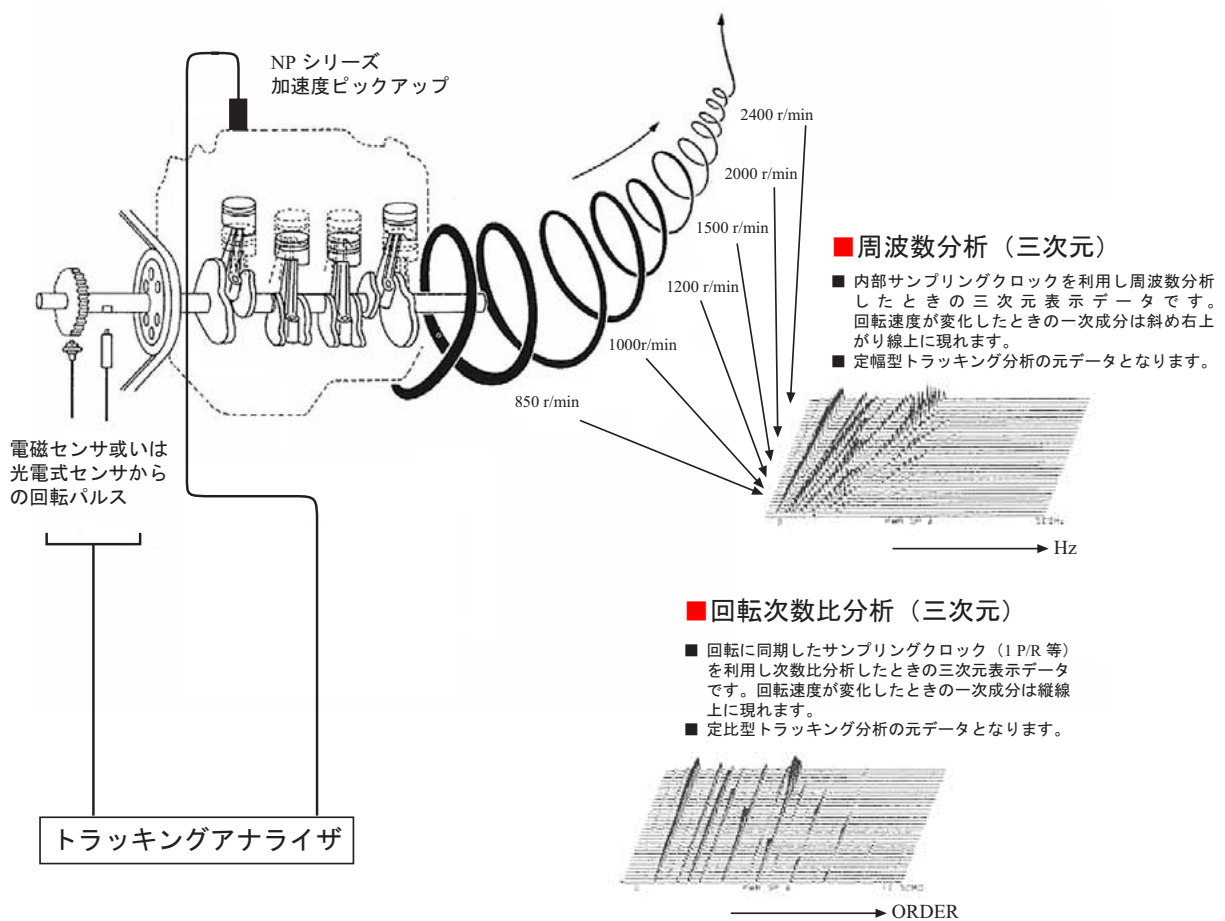
エンジンやコンプレッサ等、低回転から高回転まで幅広い回転速度の範囲をカバーしなくてはならない回転機にとっては、その回転機を構成する各コンポーネント（回転軸、ギヤ、ブラケット等の部品）の持つ固有振動数と回転速度との共振が最も重要な問題になります。大型発電機等のねじり振動の場合、共振が許容応力を超える大きな励振エネルギーを生み出し、破壊を招く重大事故にもなりかねません。また、振動騒音対策では回転機がどの回転速度で振動や騒音が大きくなるか、その原因として回転機を構成するどのコンポーネントから振動や騒音が発生しているのか知りたいところです。このようなことを調べる方法として“1回転当たりを1周期として1回発生する現象を回転1次成分、そのn倍を回転n次成分と定義し、X軸を次数にとりY軸を次数成分の振動騒音の大きさとしてあらわす「回転次数比分析」”や、“回転速度の上昇または下降変化によって注目する次数成分の振動騒音の大きさがどのように変化するかを分析する「回転 - トラッキング解析」”が良く利用されます。なお、回転との比較から回転次数比と“比”を付して使われることがありますが、この場合の次数と次数比は同じ意味です。

次ページの図1は、回転速度の上昇 50 r/min ごとに測定し三次元表示した「周波数分析」と「回転次数比分析」（以下次数比分析と称す）、並びに「回転-トラッキング解析」（以下トラッキング解析と称する）の関連を示す概念図です。周波数分析の三次元表示データではX軸が周波数（Hz）になり同一次数の成分は回転上昇につれ斜め右上がりの線上に現れますが、次数比分析ではX軸が次数（Order）のため同一次数の成分は縦方向に現れます。これが回転速度上昇時の周波数分析と次数比分析の主な違いとなります。また、トラッキング解析ではそれぞれのデータから同一次数の成分をとりだし、X軸に回転速度、Y軸にその次数成分を取ってあらわします。これによって、回転速度の上昇変化にともない注目次数成分がどのように変化したかをみることができます。つまり、回転速度が構成部品の共振周波数に近づくと注目次数成分の振動がしだいに大きくなり、共振点と一致すると最大に、回転速度が共振点を過ぎるとしだいに減少したデータとなります。こうしたデータから構成部品の共振状態を簡単に確認することができます。なお、トラッキング解析には主に「定比型トラッキング」と「定幅型トラッキング」があります。

ここではこの違いを次数比分析と周波数分析との関係から説明してまいります。

■ 回転 - トラッキング解析概念図

回転速度を 850 r/min から回転上昇させ、50 r/min 上昇毎に測定した周波数分析と回転次数比分析の三次元表示と、そのデータから一次の成分を回転トラッキング解析した様子を示しています。



■ 回転 - トラッキング解析

- 周波数分析又は次数比分析の三次元データから一次成分を抽出し、X 軸に回転速度、Y 軸に一次成分をとって現します。
- 周波数分析から定幅型、次数比分析から定比型のトラッキング分析が実行されます。

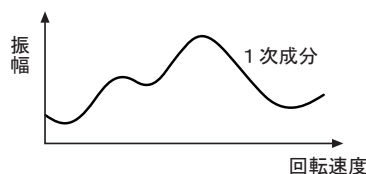


図 1

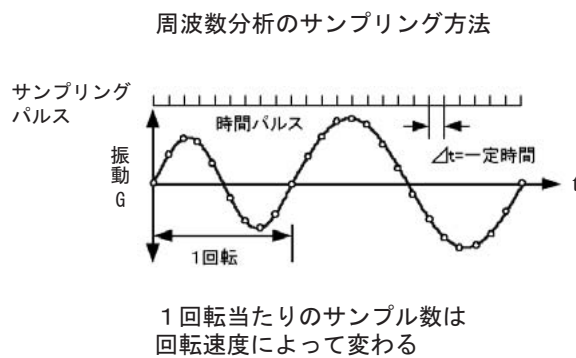
1. 次数比分析

定比型次数トラッキングの元となるデータが次数比分析です。

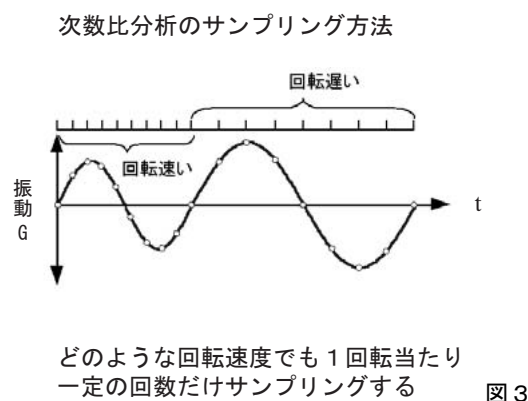
1-1 次数比分析とは

周波数分析では、FFT アナライザ内部の水晶発振器から得られた、周波数レンジの 2.56 倍の周波数のサンプリングクロックで入力信号をサンプリングします。

このサンプリング方法で回転速度が変化する回転体の振動や騒音を分析する場合、サンプリングクロックの周波数は一定なので、1 回転する時間が変化すると（回転速度が異なると）、1 回転当たりのサンプル数が変わります（次図 2 参照）。



これに対し、回転速度に同期したサンプリングクロック、例えば 1 回転当たり 64 パルスの信号を使いサンプリングを行うと、回転速度が変化しても 1 回転当たりの信号のサンプル数は変化しません（次図 3 参照）。



回転速度に同期したクロックでサンプリングされた振動・騒音信号を FFT すると、X 軸の単位が周波数 (Hz) ではなく、次数 (Order) になります。そして、次数成分のパワースペクトルとして表示したデータを回転次数比分析データと呼びます。

1-2 回転次数比とその周波数

回転1次の成分とは基準に定めた回転軸の1回転について1周期とする成分のことで、回転2次では同様に1回転について2周期とする成分です。

次数を周波数に換算して考えると、例えば600 r/min で回転している回転体の回転1次は、次の式から10 Hz が求められます。同じように、900 r/min では15 Hz となります。

$$\frac{600 \text{ r/min}}{60} = 10 \text{ Hz} \quad , \quad \frac{900 \text{ r/min}}{60} = 15 \text{ Hz}$$

このように1次の周波数は回転速度の変化に伴い変化しますが、次数単位で考える場合、「1回転あたり1周期として現れる成分を1次という」次数表現では、回転速度に関係がない単位といえます。これが次数比分析のポイントとなります。

1-3 回転変化時の回転次数比分析と周波数分析

次の2つの図は回転速度を上昇変化させカラー三次元表示させたもので、初めの図4はX軸に次数を取って表示した次数比分析を、次の図5は通常の周波数分析を示しています（スペクトルの大きさをカラーで表し、青→黄→赤色系になる程大きい値を表します）。

● 回転次数比分析（カラー三次元表示）

同一次数成分は回転速度の変化に対しても X 軸は常に一定の位置で表示されます

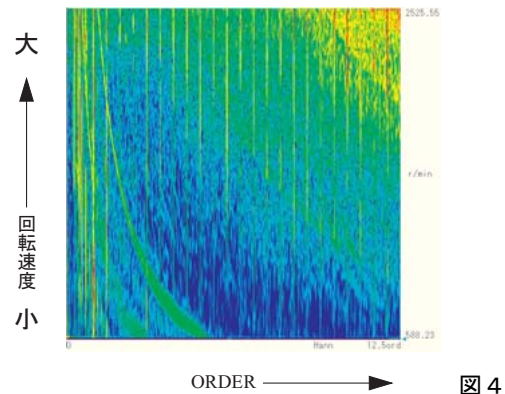


図 4

● 周波数分析（カラー三次元表示）

同一次数の成分は回転速度の変化によりその周波数が変わってくる

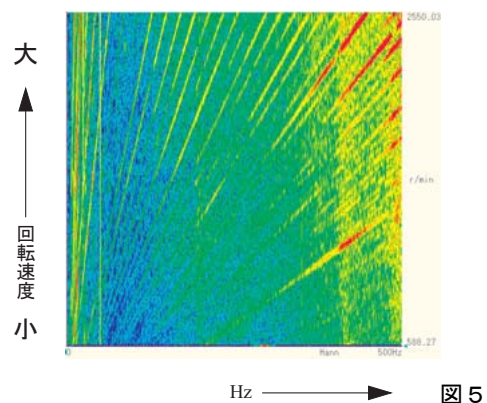


図 5

次数比分析では、図4のようにX軸は次数ですから同一次数成分は縦方向の線上に表示されていますが、周波数分析の図5では同一次数は回転速度の上昇に比例して周波数が増加しますから斜め右上がりの線上に表示されています。図中の黄赤に注目するとその様子が分かります。

1-4 次数比分析のためのサンプル信号

■外部サンプリングクロックと回転検出器

通常の周波数分析の場合、サンプリングクロックの周波数は分析周波数レンジ（分析する最大周波数）の2.56倍となります。次数比分析の場合も同様に、サンプリングクロックとして1回転当たり分析する最大次数の2.56倍のパルスが必要です。

弊社機器での最大分析次数は、6.25/12.5/25/50/100/200/400/800次となりますので、この2.56倍のサンプリング数は次表のようになります。弊社のトラッキング分析機能では回転検出器の1回転当たり出力されるパルス数（1P/R等）を設定するだけで、設定された最大分析次数に応じ下表の必要とするサンプリングパルスを自動的に分周・通倍し作成する機能を備えています。このサンプリングパルスは先に説明しました回転に同期したパルスとなっています。

最大分析次数	6.25	12.5	25	50	100	200	400	800
1回転当たりのサンプリング数	16	32	64	128	256	512	1024	2048

1-5 次数比分析の分解能

内部サンプリングクロックによる周波数分析の周波数分解能は、解析データ長1024点の時は設定周波数レンジの1/400に、2048点の時は1/800になります。例えば周波数レンジを1kHzに設定すると1000/400=2.5Hz（解析データ長1024点）となり、2.5Hz毎にスペクトルを読みとることができます。これに対し、回転に同期した外部サンプリングクロックによる次数比分析の場合、最大分析次数とその次数分解能の関係は次の式のようにになります。

$$\text{次数の分解能} = \frac{\text{最大の分析次数}}{N} \quad \text{[次]} \quad (1)$$

Nはスペクトルライン数

N:400（解析データ長1024点の時）

N:800（解析データ長2048点の時）

次数分解能については、今までの説明のように回転速度に関係がなく、上記の式 (1) により求めることができます。次に次数分解能を周波数に換算して考えてみましょう。

例えば、解析データ長 1024 点で最大分析次数が 100 次の場合は、その次数分解能を周波数に換算すると下記式のように回転速度 600r/min では 2.5Hz、6000r/min では 25Hz と回転速度に比例して分解能が変わります。次数分解能を次数単位で考えると上記 (1) 式のように回転速度に関係なく一定ですが、周波数単位に換算すると下記 (2) (3) 式のように回転速度に比例して変わり、このことから次数比分析は「定比」といわれています。一方、周波数分析の場合の周波数分解能は回転速度に関係なく一定となりますので「定幅」といわれます。

次数分解能から周波数への換算式

$$\text{次数分解能 (Hz)} = \frac{\text{最大の分析次数}}{N} \times \frac{\text{回転速度 (r/min)}}{60}$$

● 回転速度 600 r/min

$$\text{次数分解能} = \frac{100}{400} \times \frac{600}{60} = 2.5 \text{ Hz} \quad (2)$$

● 回転速度 6000 r/min

$$\text{次数分解能} = \frac{100}{400} \times \frac{6000}{60} = 25.0 \text{ Hz} \quad (3)$$

1-6 エイリアシング現象

次数比分析の場合も、周波数分析と同じようにエイリアシング現象が発生する場合があります。エイリアシングについては次ページの備考欄を参照ください。

このエイリアシング現象について考えてみます。いま、分析したい最大次数を M 、回転速度を N r/min とすると、最大次数の周波数 f_x は次式 (4) で求めることができます。また、外部サンプルモード時は、サンプリング周波数 f_s は最大次数の周波数 f_x の 2.56 倍に自動設定されます。その時、アンチエイリアシングローパスフィルタ (デジタルフィルタ) もサンプリング周波数に連動して掛かりますから、通常エイリアシングは発生しません。

$$\begin{aligned} f_x &= M \times \frac{N}{60} \quad [\text{Hz}] \\ \frac{1}{2} f_s &= \frac{2.56 \times f_x}{2} \quad [\text{Hz}] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、アンチエイリアシングローパスフィルタがサンプリング周波数に連動しなくて固定の場合を考えてみます。ローパスフィルタのカットオフ周波数を 1000 Hz とします。例えば、分析したい最大次数を 25 次、回転体の回転速度を 2400 r/min とすると、25 次の周波数 f_x は次式から 1000 Hz、同様に $f_s/2$ は 1280 Hz が求められます。この時、1000 Hz 以上の成分はローパスフィルタでカットされ、エイリアシングは発生しないことが分かります。

$$f_x = 25 \times \frac{2400}{60} = 1000 \text{ [Hz]} \quad (5)$$

$$\frac{1}{2}f_s = \frac{2.56 \times 1000}{2} = 1280 \text{ [Hz]}$$

次に、ローパスフィルタのカットオフ周波数を 1000 Hz に固定にしたまま、回転速度が 1000 r/min に下降すると仮定すると、25 次の周波数 f_x は次の式から 416.7 Hz、同様に $f_s/2$ は 533.4 Hz が求められます。この場合、533 Hz ~ 1000 Hz（ローパスフィルタ）の間の成分がエイリアシング現象（折り返し）として発生対象となります。従って、振動騒音などの信号成分がこの周波数帯に存在すると、ローパスフィルタのカットオフ周波数を 1000 Hz に設定したままではエイリアシング現象が発生することが分かります。

$$f_x = 25 \times \frac{1000}{60} = 416.7 \text{ [Hz]} \quad (6)$$

$$\frac{1}{2}f_s = \frac{2.56 \times 416.7}{2} = 533.4 \text{ [Hz]}$$

そこで、トラッキング分析機能では回転速度を変化させながら分析を実行する場合、フィルタのカットオフ周波数が回転速度に応じて変化するトラッキングローパスフィルタが装備されています。

エイリアシング現象とは？

サンプリング定理により信号の最高周波数成分 f_m に対し 2 倍以上のサンプリング周波数でサンプルすることが必要であり、サンプリング周波数の 1/2 の周波数をナイキスト周波数といいます。元の時間信号がナイキスト周波数以上の周波数帯域 f_m を含む場合、その周波数スペクトルに $\left(f_m - \frac{1}{2}f_s\right)$ 成分が f_s を中心に折り返された周波数位置に現れます。この現象をエイリアシング（折返し）と呼び、それを避けるために $1/2f_s$ 以上の信号をカットするアンチエイリアシングローパスフィルターを備えています。

2. 回転-トラッキング解析

2-1 定比型トラッキング解析

回転体からの回転パルスを用いて FFT アナライザのサンプリングクロックとして使用し、横軸を周波数ではなく回転次数で規格化したものが、前項で解説した次数比分析であり、下図 a のように表示されます。

回転 - トラッキング解析のうちの定比型トラッキング解析は、この次数比分析でもとめられた次数成分のうち任意の成分を指定して、下図 b の回転速度 - スペクトル線図のように回転速度を変化させて、その次数成分のレベル変化を回転速度に応じて追従するトラッキング分析であり、表示は図 c のようになります。

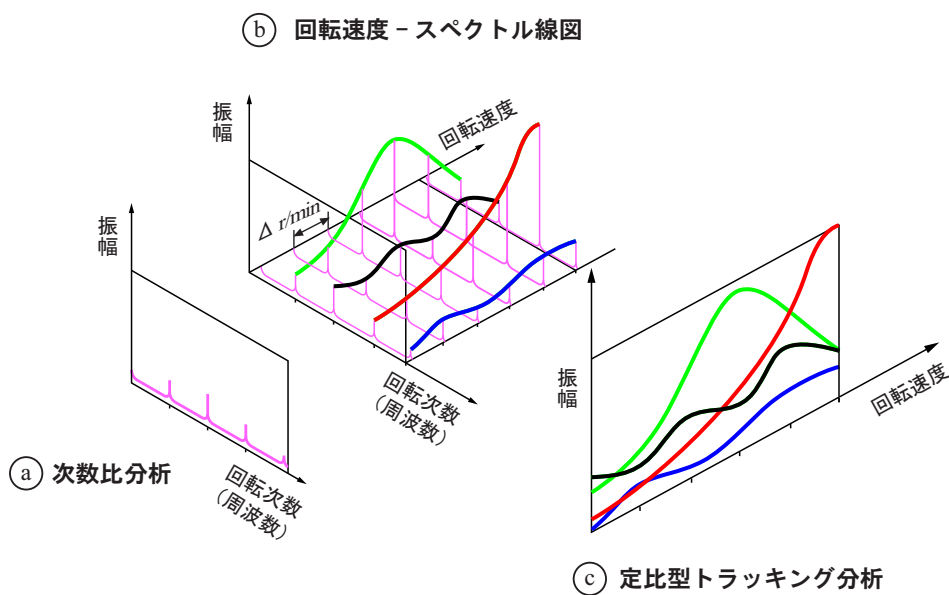


図 6

下図 7 は、騒音を 1 次、2 次、3 次、4 次の定比型トラッキング分析した例です。

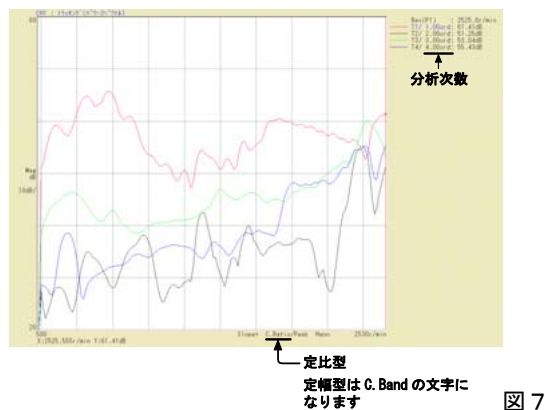
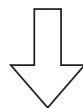
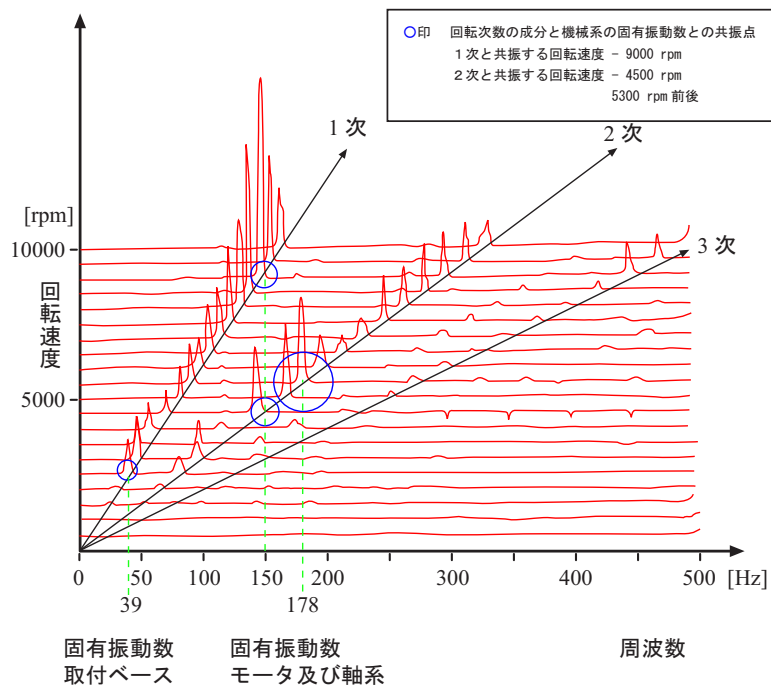


図 7

2-2 定幅型トラッキング解析

下図8は定幅型トラッキング分析の例を示します。FFT アナライザの内部サンプリングクロックを使用し、周波数分析した3次元表示とそのデータから任意の次数成分を抽出し、作図することでトラッキング分析を行います。

■ 周波数分析三次元表示



■ 定幅型トラッキング分析

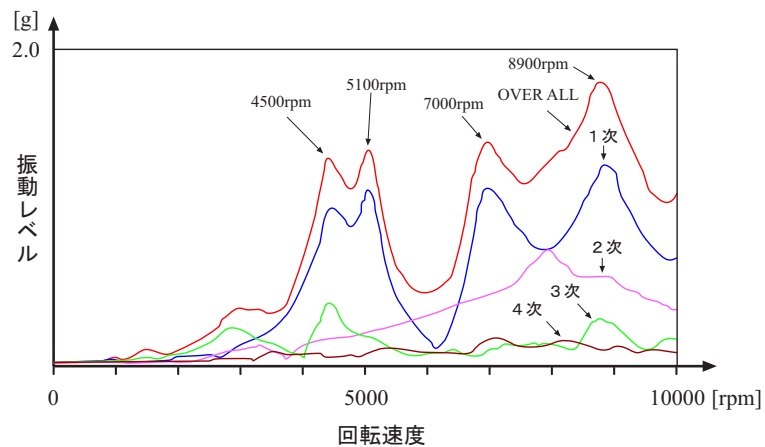


図8

2-3 その他のトラッキング分析

定比型、定幅型トラッキング分析の他に、次のようなトラッキング分析があります。分析方法は定幅型と同様に行います。

● 定幅周波数トラッキング

内部サンプリングクロックを利用して指定された周波数成分を回転速度に応じて追従するトラッキング分析です。次数比分析ではありませんのでご注意ください。

● オクターブトラッキング

定幅周波数トラッキングと同様ですが、1/3、1/1 オクターブバンドデータの指定されたバンド成分を回転速度に応じて追従するトラッキング分析です。

2-4 トラッキング分析と回転変化率について

トラッキング分析を行うときは回転速度を上昇させながら、または下降させながら測定を行います。分析演算時間に対し回転速度の変化が速すぎるとスペクトルの波形にずれが生じ、正しい分析ができません。下図9は回転上昇時の次数分析を行った場合、回転変化率の違いによるスペクトル分析の結果を示しています。図9-aは回転変化率が小さい場合で適切に分析されています。図9-bは回転変化率が大きい場合で、スペクトルのピークが本来の次数の位置から小さい方へずれています。図9-cは回転変化率が大変大きい場合で、ピークの裾が低い次数方向に広がっています。試験予定の回転変化で運転し、次数比分析、周波数分析データが図aのようになっているか確認後、本試験を行うことが重要です。

● 回転変化率が小さい場合

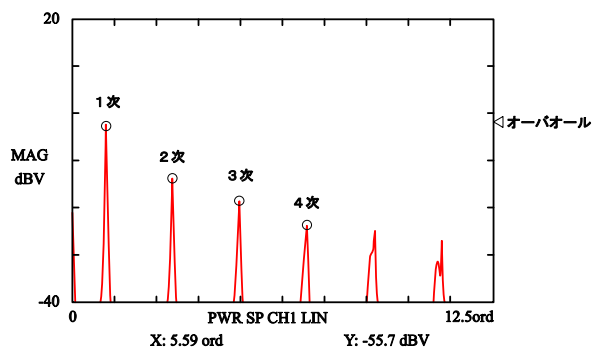


図 9-a

● 回転変化率が大きい場合

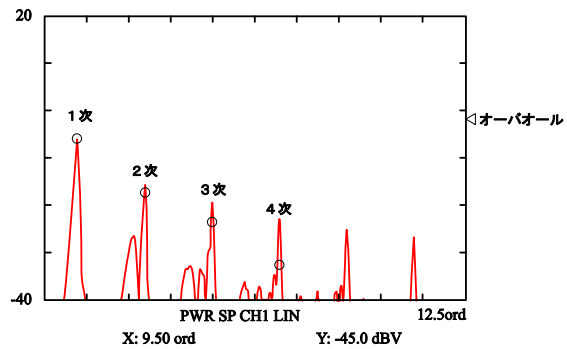


図 9-b

● 回転変化率が大変大きい場合

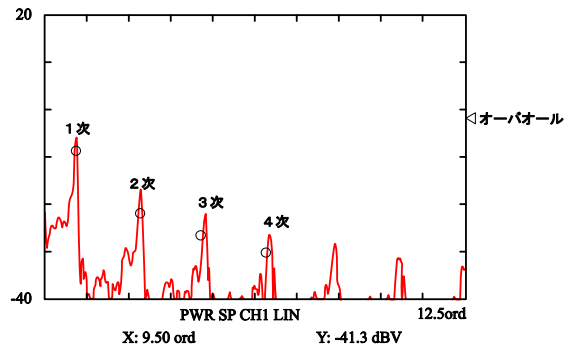


図 9-c

3. まとめ

今までご説明しましたことをトラッキング解析の主力である定比型次数トラッキングと定幅型次数トラッキングを比較してまとめてみました。

3-1 定比型次数トラッキングと定幅型次数トラッキング

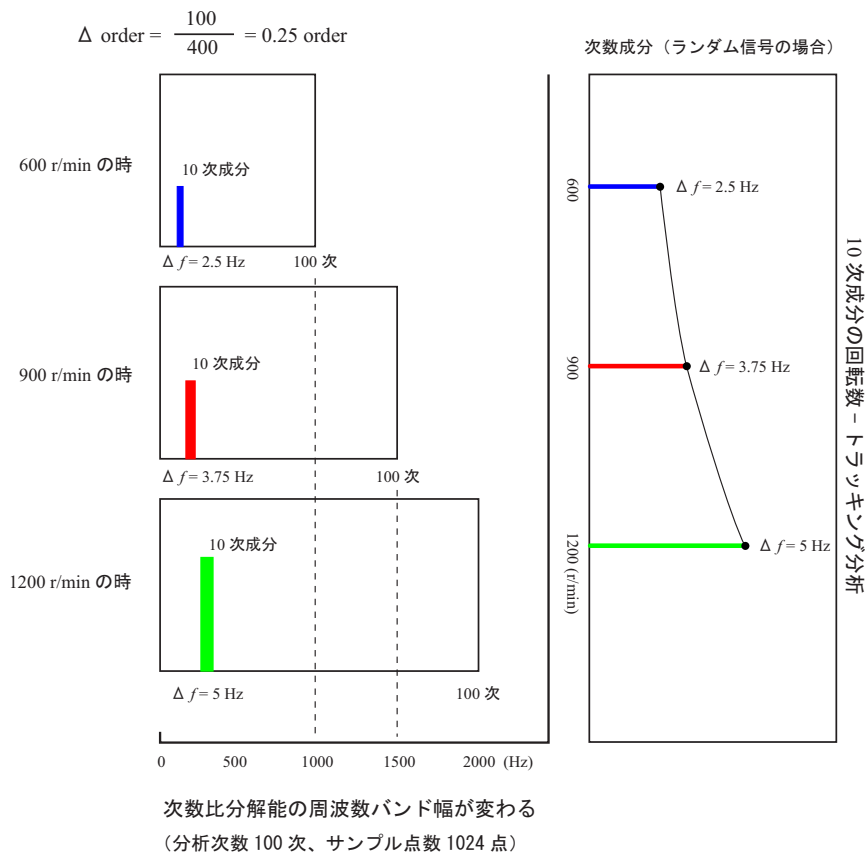
定比型次数トラッキングとは、回転体から得られる回転パルスを外周サンプリングクロックとして利用し次数比分析を実行します。その中で注目する次数成分のスペクトルレベルの変化を回転体の回転速度の変化に対応してプロットする分析手法です。

定幅型次数トラッキングは、内部サンプリングクロックによる周波数分析を実行し、回転速度が変化する毎に、周波数レンジとその時の回転速度から注目する次数の周波数を計算し、その該当する周波数成分のスペクトルレベルの変化を回転速度の変化に対応してプロットしていきます。

定比型トラッキング分析、次数比分析では、次数軸で見みると、回転速度に関係なく、最大分析次数、次数分解能（次数バンド幅）が一定となります。これを周波数軸で見ると図 10 の左のように回転速度変化に従い最大次数の周波数、次数分解能の周波数バンド幅が変化します。この影響は、例えば振幅が一定のランダム信号を分析した場合、回転速度が大きいほど次数成分のレベルが大きくなります。特にオーバーオールでは周波数範囲が広がりますのでこの傾向が顕著となります。図 10 の右にランダム信号を分析した様子を示します。

定幅型次数トラッキング分析、周波数分析では、周波数軸で見ると回転速度に関係なく、周波数レンジにより最大周波数、周波数分解能（周波数バンド幅）は一定となります。

図10と対比させて図11にこの様子を示します。回転速度が変化しても次数に対応した周波数の周波数バンド幅、オーバーオール周波数範囲は一定であるということは、次数軸で見れば、回転速度が低いときは次数バンド幅が広く、回転速度が大きくなるに従い次数バンド幅が狭くなることになります。言い換えると定幅型次数トラッキング分析では定比型トラッキング分析に比べ回転速度が大きくなるに従い次数成分のレベルは小さくなる傾向を持つこととなります。ややこしくなりましたが、次数比分析か周波数分析かでそれぞれ相反するような関係があり、定比型定幅型それぞれの特徴を理解し使い分けることが必要です。



600 r/min の時の 100 次の周波数 f は ;

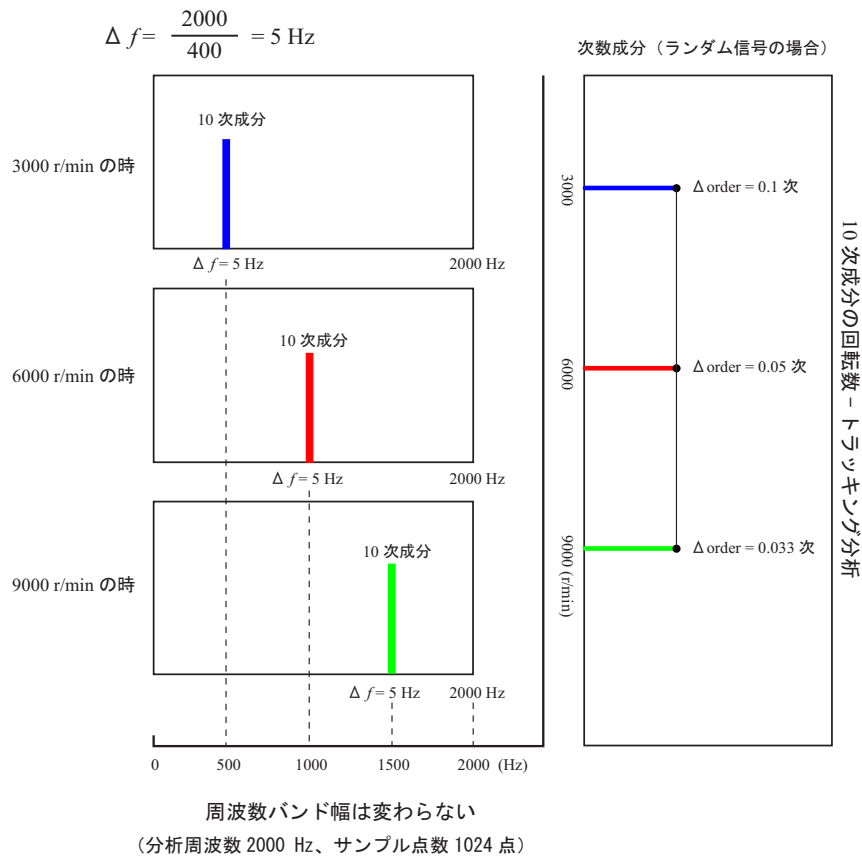
$$f = \frac{600 \times 100}{60} = 1000 \text{ Hz}$$

各次数成分の周波数帯域幅 Δf は ;

$$\Delta f = \frac{1000}{400} = 2.5 \text{ Hz}$$

同様に、1200 r/min では、 $\Delta f = 5 \text{ Hz}$ 。

図10 定比型次数トラッキング分析



3000 r/min の時の 100 次の周波数 f は ;

$$f = \frac{3000}{60} \times 100 = 5000 \text{ Hz}$$

3000 r/min の時の $\Delta \text{order} = 1$ 次の周波数 Δf は ;

$$\Delta f = \frac{3000}{60} \times 1 = 50 \text{ Hz}$$

$\Delta f = 5 \text{ Hz}$ では $\Delta \text{order} = \frac{5}{50} = 0.1$ 次 となります。同様に、9000 r/min では、 $\Delta \text{order} =$ 約 0.033 次 となります。

図 1.1 定幅型次数トラッキング分析

定比次数トラッキングと定幅次数トラッキングの注意点は次の通りです。

定比型次数トラッキング	定幅型次数トラッキング
<ul style="list-style-type: none"> • 次数分解能は回転速度に関係なく一定である。 • 次数成分が明確なピークを持っていないランダムノイズ的な信号の場合は回転速度が高いと周波数バンド幅（分解能）が広がるためスペクトル数値が大きくなる傾向がある。 	<ul style="list-style-type: none"> • 周波数分解能は回転速度に関係なく一定である。 • 周波数レンジが低いと定比型次数トラッキングほど回転上昇率を大きくできない。 • 予め最高周波数を決めてから分析次数を設定しなければならない（周波数レンジを設定することで周波数の上限が制限されるため）。

-以上-