

第 2 章 振動測定技術

第2章 振動測定技術

本章の狙い

本章では、FFT アナライザについての基礎知識、ハンマリング試験の基本、及び、センサの選定から FFT アナライザを使った実際のハンマリング試験手順について説明する。

第2章の構成を図 2-1 に示す。

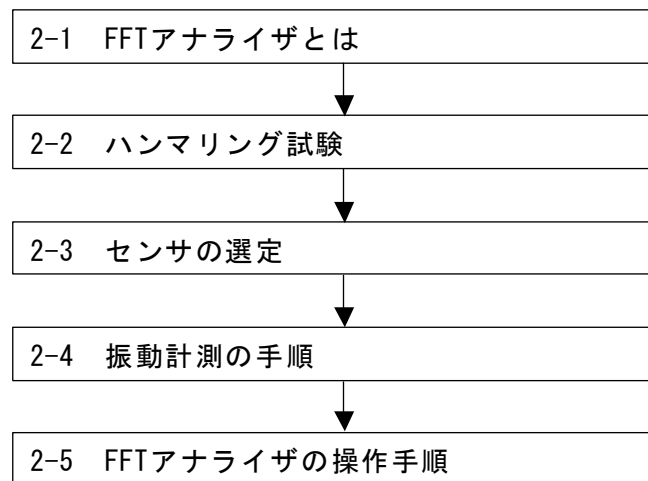


図 2-1 第2章の構成

第1節 FFT アナライザとは

2-1-1 FFT とは

フランスの数理学者 Fourier の発見したフーリエ変換は、理論的にはフーリエ級数をその源としている。フーリエ級数は、どんな複雑な波形も同じ形を繰り返す周期性を持った波であれば、複数の単純な正弦波（Sin 波）と余弦波（Cos 波）の級数で表現することが出来るという理論である。この理論を数式で表現したものをフーリエ級数という。さらに、この級数を $-\infty \sim +\infty$ まで拡張し、発展させたものがフーリエ変換である。実際測定しようとする信号は、どこまで観測すれば周期性があるかわかるのか不明である。まして、無限大時間まで測定するとなると気の遠くなる話になる。そこで、一般的には観測される波形の内、適当な時間分を切り取り、切り取った波形が無限に繰り返される信号と仮定し、この波形に対してフーリエ変換を行う。当初、このフーリエ変換の計算は、膨大な回数の掛け算計算が必要であったが、データ数を 2 の n 乗個にとることにより計算回数を少なくする方法が J.W.Cooley と J.W.Tukey により提案された。データ数を 1,024 とすると、 $1,024 \times 1,024 = 1,048,576$ 回の掛け算が 10,240 回に短縮される。この方法が、Fast Fourier Transform（高速フーリエ変換）といわれ、その頭文字を取って FFT と一般的に呼ばれるようになった。

2-1-2 なぜ FFT アナライザが必要か

一般に、機械や家電製品などの騒音や振動問題は、量産品の出荷検査やお客様からのクレームといったかたちで、例えば「音がうるさい」とか「製品のある部分が振動している」といったように表面化する。

これに対して対策を施すわけであるが、まずは原因究明が必要となり具体的には、「問題となっている音や振動」の原因を探ることになる。簡単に言うと、どこから「問題の音が出ているのか」、「どの部品が振動しているのか」を探ることになる。現場的には、「この部分（部品）を手で押さえると、問題の音が小さくなる」といった感じで、問題の箇所、あるいは部品を絞り込む場合もある。音は、ある部品の振動によって発生していることが多いので、音に関する指摘から始まるトラブルシュートも、最終的には振動対策を施すケースもある。

一方、製品等の各部位から発生する振動が周波数の何 Hz なのかは、製品あるいは部品の構造から決まる。

設備の維持管理や異常診断などでは、振動計による振動全体のレベル（これをオーバオール値という。）を測定していた。しかし、オーバオール値では振動の大小しか判断できないため、何処が異常箇所なのかを掴むことができないことがある。

また、波形観測（時間領域）でよく使われるオシロスコープでは、波形の時間的な変化（時間軸波形）をみることはできるが、波形の時間的な変化が何に起因しているの

かを求めることは困難である。

FFT アナライザによる周波数分析データを利用すれば、変化が生じたのは周波数で何 Hz なのか、その周波数は対象物のどの部位から発生するのかを検討することができる。例えば、実験モード解析では、FFT アナライザを使い伝達関数を計測し、対象の構造による共振周波数（固有振動数）を振動モード形状という形に可視化して、対策を検討する上での情報を得ることができる。

他にも、特に、故障の初期段階や微小な異常の場合、オーバオール値や時間軸波形にはほとんど変化が無く検出は困難だが、周波数分析をする（周波数領域で見る）ことにより微小な異常の検出も可能となる。最近では、こうした振動分析による設備管理・異常診断に加え、事務機や家電製品などでは、静音性の評価や騒音原因及びその対策方法を検討するための騒音分析など様々な分野で周波数分析が利用されている。

2-1-3 最近の FFT アナライザについて

FFT アナライザも従来のいわゆる箱物計測器から、PC (パソコン) の普及に伴い、図 2-1-1 に示す PC を利用したものが主流となってきている。特に PC ベースの計測器は、もはや FFT アナライザの機能にとどまらず、様々な分析・解析が可能になっている。これは、振動や騒音の原因究明などの手助けになる機能が増えた反面、「簡単なことしかしないのでもっとシンプルな操作性が欲しい」といった要求につながっている。

最後になるが、FFT アナライザを使う上で重要なことは、対象物の振動を精度よく検出できる検出器（センサ）を選定し、センサで検出した振動（電圧）を正確（チャンネル間の位相精度など）に A/D (アナログ/デジタル) 変換する FFT アナライザを正しく設定し、正確な振動計測データを得ることにつきる。

FFT 解析は、もともとは定常信号の解析手法であるため、高い時間分解能を必要とし、リアルタイム分析には適していないが、数 mHz から数十 Hz の周波数分解能を持っている。このため、機械の共振周波数の精密測定や周波数差の少ない複合騒音の分析なども可能である。

このようにすぐれた性能を持つ FFT アナライザですが、FFT 解析が有限長の時系列信号データのデジタル演算となるため、正確な計測のためには若干のノウハウが存在する。以下、伝達関数の計測、実験モード解析を例に、振動計測と振動の可視化について説明する。



図 2-1-1 PC ベース FFT アナライザの例
(小野測器 DS-2000 シリーズ<Graduo>)

2-1-4 FFT アナライザの仕組みについて

(1) FFT アナライザの内部処理

一般的な FFT アナライザの内部処理の概要を図 2-1-2 に示す。

センサで検出された騒音や振動は、電圧信号として FFT アナライザに入力される。騒音や振動の時間領域の連続データ (アナログ信号) は、FFT アナライザで周波数領域のデジタル信号に変換される。

PC ベースの FFT アナライザでは、図 2-1-2 に示した演算は FFT アナライザ側で行い、PC のソフトウェアで演算されたデータを様々なグラフ (関数) にして表示することができる。

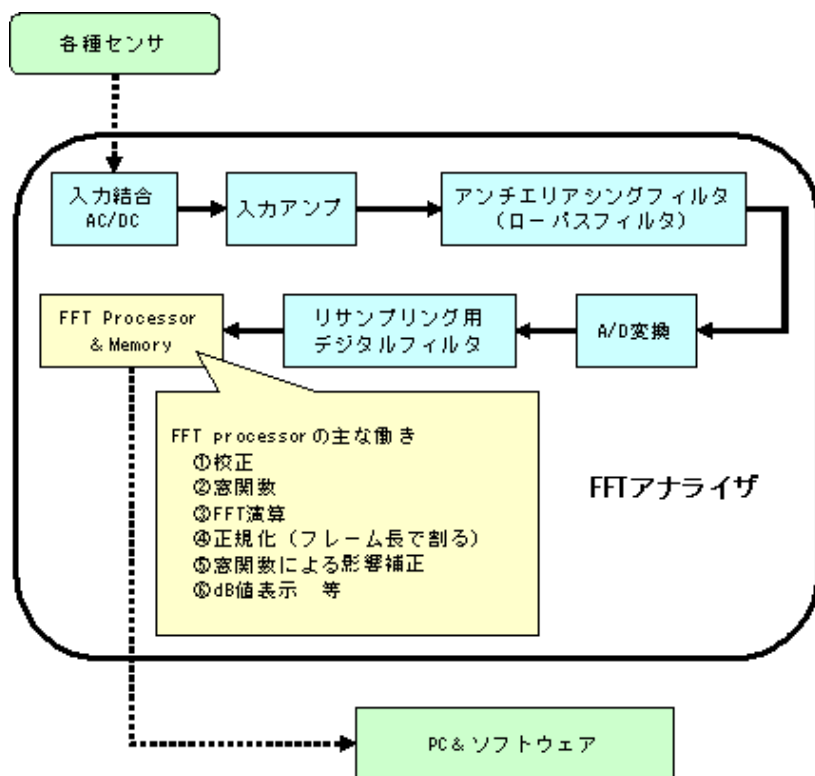


図 2-1-2 FFT アナライザの内部処理の概要

(2) AD変換とサンプリング

FFTアナライザでは、デジタル化した信号を扱う。図2-1-3に示すとおり、FFTアナライザに入力されるアナログ信号をデジタル化するのがA/D変換器で、入力電圧が±1VでA/D変換器のビット(bit)数が24であれば、±1Vを 2^{24} すなわち16,777,216等分(約 $0.11921\mu\text{V}$)することになる。

ちなみに16bitでは、 2^{16} すなわち65,536等分(約 0.0305mV)になる。

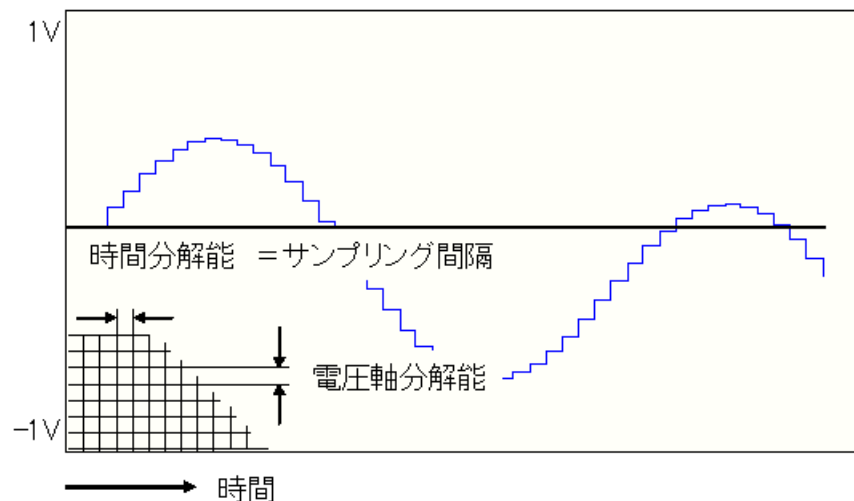


図2-1-3 サンプリングと電圧軸の分解能の関係

このとき、FFTアナライザのサンプリング点数とデータ長、解析周波数レンジの関係は、次式のようにになる。

$$T = \frac{N}{2.56 \cdot f}$$

N : サンプリング点数

T : 取り込み時間 ($\Delta t \cdot N$)

連続信号をサンプリングした時間の長さ (時間長)

f : 解析周波数レンジ

FFTアナライザで使われる用語の関係は、次のとおりである。

F_{span} : FFTアナライザの分析周波数レンジ

f_s : サンプリング周波数 ($= F_{span} \cdot 2.56 = 1/\Delta t$)

Δt : サンプリングの時間間隔 ($= 1/f_s = 1/F_{span} \cdot 2.56$)

L : 分析ライン数 ($= N/2.56$)

L は、100、200、400、800、1600 など

Δf : 周波数分解能 ($= F_{span} / N$)

(3) リアルタイム解析

リアルタイム解析とは、図 2-1-4 のようにサンプリングされたデータに対して、各 FFT 演算の間があくことなく連続して FFT が実行される解析状態のことである。

DS-0221/0222 アプリケーション ソフトウェアでは、最初に信号の解析データ長分のサンプリングを行い、次にそのデータに対して FFT を実行する。さらに、FFT 演算の間に次のデータを取り込んでおき、前の演算が終了するとすぐに次の演算を実行する方式を採用している。

そのため、図 2-1-4 のように、サンプリングにかかる時間より FFT を実行する時間（表示に要する時間まで含む）が短ければ真の意味でのリアルタイム解析が実行できる。

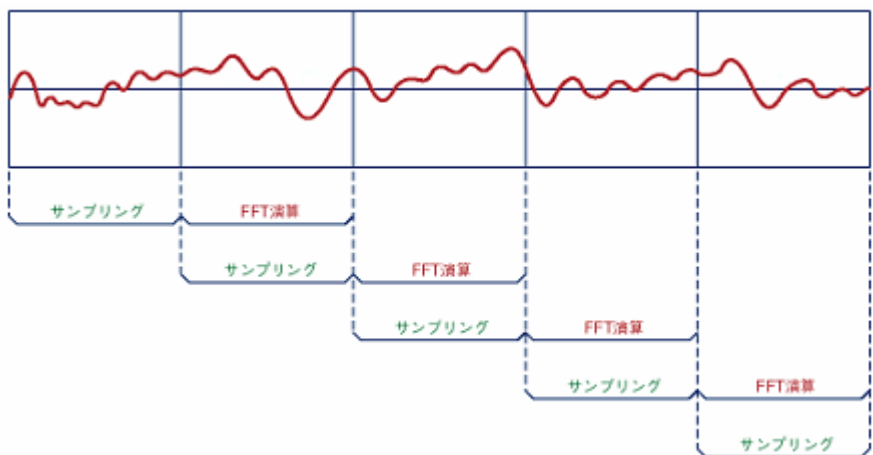


図 2-1-4 リアルタイム解析

図 2-1-5 に示すように、FFT 演算の実行に要する時間よりサンプリング時間が短いと信号の取りこぼしが発生する。これをノンリアルタイム解析と呼ぶ。

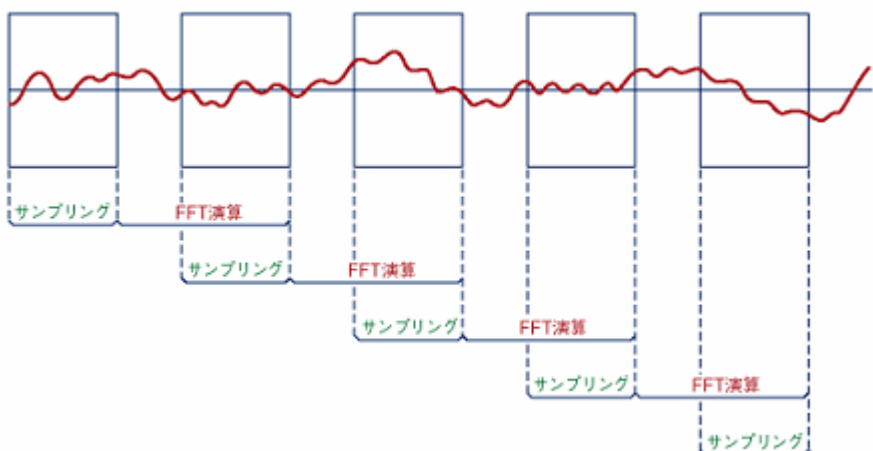


図 2-1-5 ノンリアルタイム解析

ちなみに、FFT 演算時間よりサンプリング時間の方が長いときには、ウィンドウの一部を前のウィンドウと重ねること（オーバーラップ処理）ができる。図 2-1-6 では、演算の実行に要する時間よりサンプリング時間が長いため、オーバーラップ処理をしている。

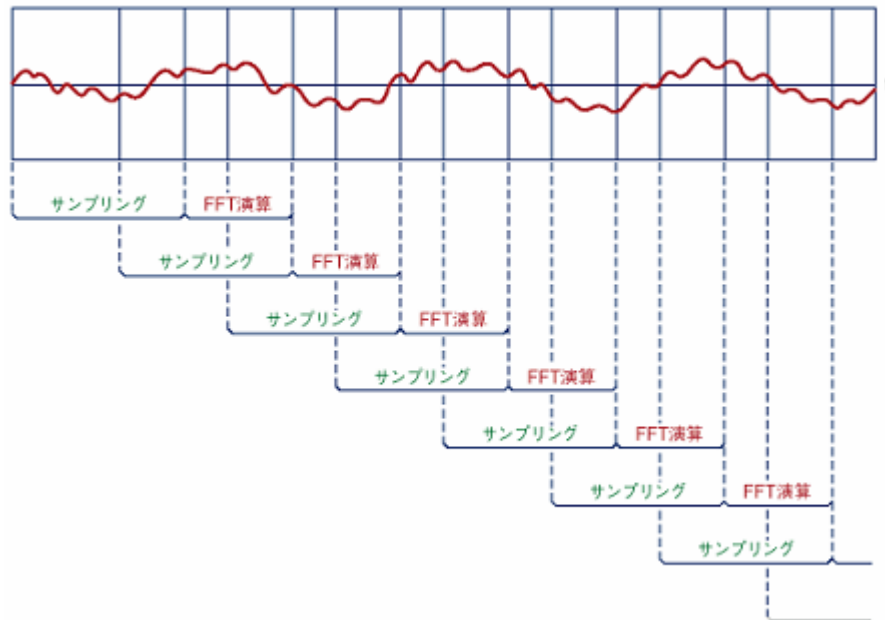


図 2-1-6 オーバーラップ処理

(4) トリガ機能

トリガとは、入力信号のある点、または外部信号を合図にサンプリングを開始する機能である。非定常信号はトリガを使用しないと補足できないことが多いが、この機能により、波形のうちの解析したい部分を効率よく捕らえて分析することもできる。また、時間波形の平均化を行う際はトリガ機能によって波形を同期させることができる。

トリガの入力源は、以下の2つある。

a 内部トリガ

入力信号そのもののサンプリング開始を知らせる信号、すなわちトリガ信号として、それが設定電圧に達した時点を目安にサンプリングを開始する。

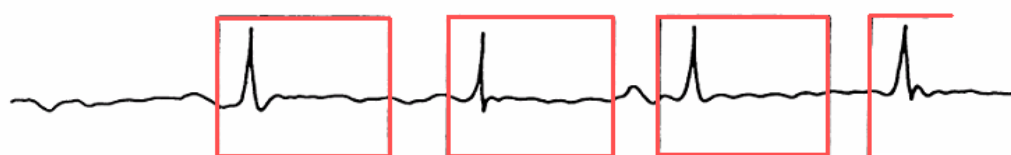
b 外部トリガ

外部からパルス信号を入力し、その時点を目安にサンプリングを開始する。

図 2-1-7 にトリガ機能を図示する。赤線枠が FFT アナライザの 1 フレームを示す。同図より、トリガ機能を使わないと単発現象を捕らえきれない場合が多く、トリガ機能を使うことにより、画面上の設定した位置で同期していることがわかる。



(1) トリガ機能を使わない場合



(2) トリガ機能を使った場合

図 2-1-7 トリガ機能

FFT アナライザのトリガモードの種類を図 2-1-8 に示す。

リピートトリガは、一般的な計測に使われるトリガモードで、トリガがかかるたびに 1 フレームずつ取り込む。

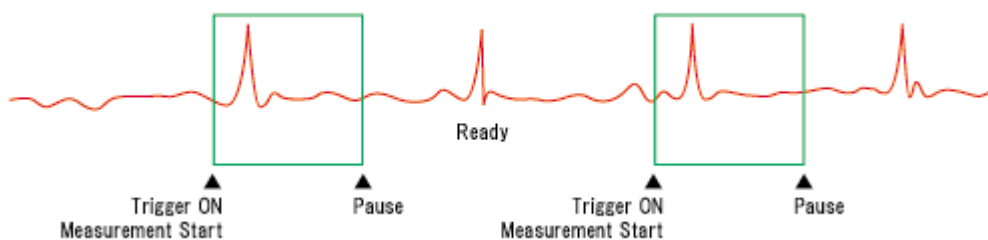
シングルトリガは、トリガがかかってから 1 フレーム取り込んだ後、トリガ待ちの状態になる。

ワンショットトリガは、トリガがかかってから 1 フレームを取り込んだ後、トリガ

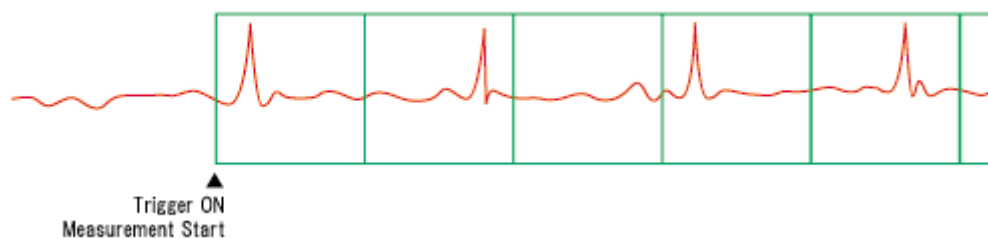
をかけていないトリガフリーの状態になる。



(1) リピートトリガ



(2) シングルトリガ



(3) ワンショットトリガ

図 2-1-8 トリガモード

FFT アナライザのトリガポジションには、プレトリガとポストトリガに分類される。一般的な計測では、プレトリガが使われる。

プレトリガは、トリガ点（トリガのかかった点）より前からデータの取り込みを開始する。ポストトリガは、トリガ点より後ろからデータの取り込みを開始する。

FFT アナライザでは、トリガ信号に含まれるノイズによって誤ったタイミングでトリガがかかるのを防ぐために、ヒステリシスの設定ができる。ここでいうヒステリシスとは、トリガ信号に対する不感帯の設定になる。図 2-1-9 に、ヒステリシスの設定例を示す。同図では、トリガ信号の電圧レンジに対する範囲を%で設定している。

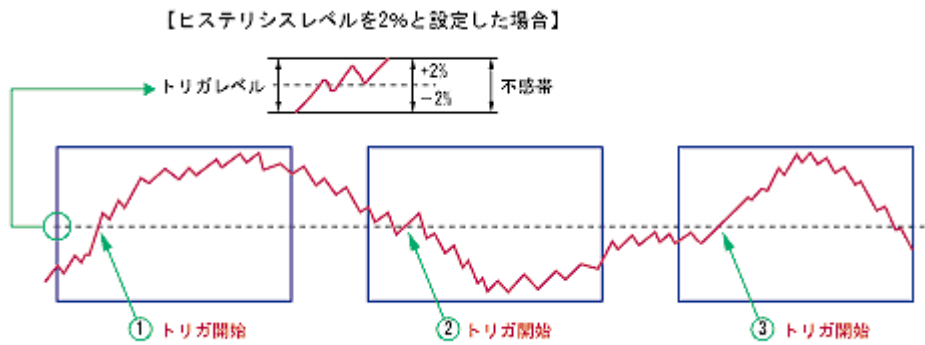


図 2-1-9 トリガ信号のヒステリシス設定

FFT アナライザのトリガ設定にスロープの設定がある。これは、トリガをかける極性（信号の立ち上がり、立ち下がり、極性無視）のことである。FFT アナライザのスロープ設定の種類を表 2-1-2 に、立ち上がりと立ち下がりの例を図 2-1-10 に示す。

表 2-1-1 FFT アナライザのスロープ設定

	FFT アナライザの設定	説明
立ち上がり	+	信号が立ち上がり、設定したレベルに達したときにトリガをかける。
立ち下がり	-	信号が立ち下がり、設定したレベルに達したときにトリガをかける。
極性無視	+/-	信号の立ち上がりまたは立ち下がりに関係なく、設定したレベルに達したときにトリガをかける。

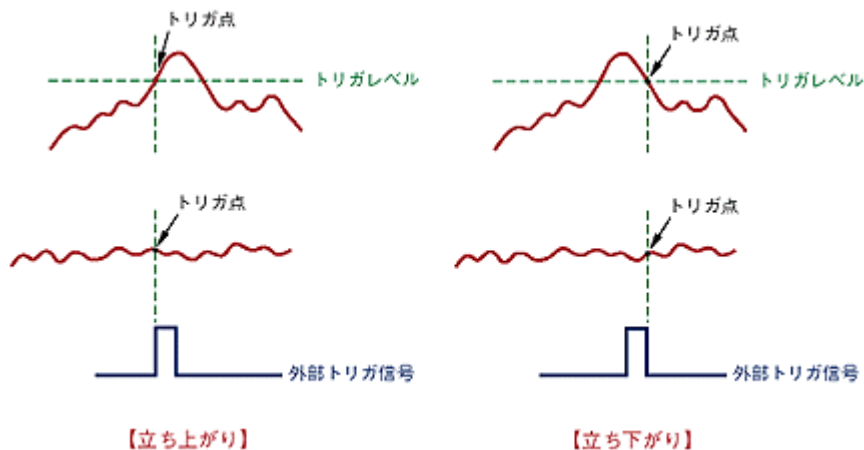


図 2-1-10 FFT アナライザのスロープ設定

(5) ダブルハンマキャンセル機能

ダブルハンマリング（2度叩き）したデータは、周波数応答関数の精度に悪影響を与える。ダブルハンマキャンセル機能は、加振波形の最大値に対して、設定値以上の信号が同一フレーム内に1つでもあれば、そのフレームをキャンセルする方法をとっている。なお、ダブルハンマキャンセル機能は、インパルスハンマを用いた測定時のみ必要な機能で、インパルスハンマを使用しない測定には必要はない。

(6) ADD+1 機能（平均化許可機能）

ADD+1 機能を有効にすると、インパルス加振時などリピートリガモードによる加算平均をする場合に、加算波形を確認しながら平均化処理を実行することができる。例えば、入力オーバーや加振ミスした信号を平均化処理から削除することも可能となる。

トリガがかかりデータを取り込むと、次のデータが取り込まれるまでこのデータを保持することになる。

ADD+1 機能がオンのときには、取り込んだデータに対し加算平均有無の指示があるまでポーズ状態で待機しているので、加算平均を実行するかしないかを決定する。

加算平均をした場合には、次のトリガがかかり、加算平均をしなかった場合には、取り込んだデータは新たに取り込んだデータに書き替えられる。（破棄される）

図 2-1-11 に、ADD+1 機能についての上述の説明図を示す。

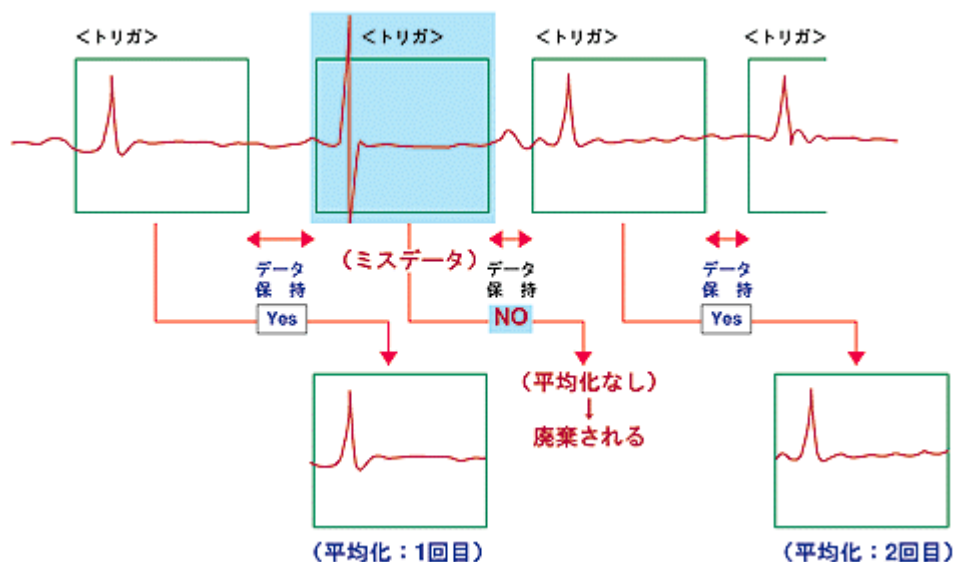


図 2-1-11 ADD+1 機能

2-1-5 最近の FFT アナライザ（ソフトウェア）

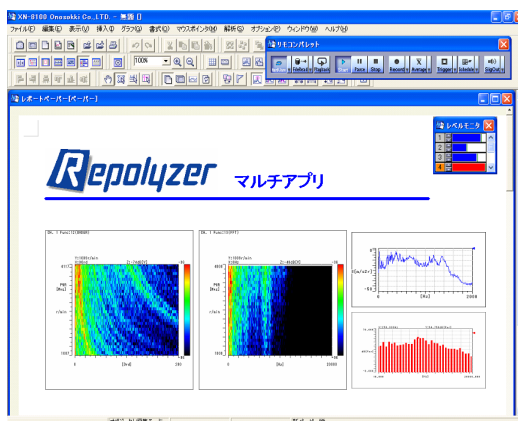
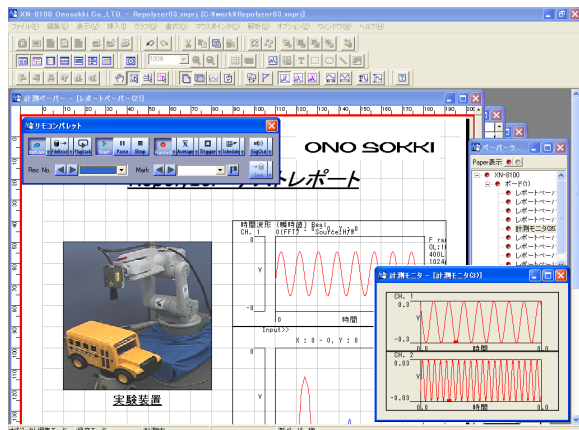
最近の FFT アナライザでは、パソコンとフロントエンド（FFT のハードウェアユニット）の組み合わせを活用し、周波数解析以外に、回転体の振動解析に有効なトラッキング解析（次数比解析）、騒音分析に使われるリアルタイムオクターブ解析、DAT などのような連続時間データの収録などもできるようになってきている。

例えば、リアルタイムオクターブ解析と同時に FFT 解析をリアルタイム解析しながら、データ収録できるマルチアプリケーション機能を実現したり、FFT 解析においても複数の周波数レンジの FFT 解析を同時に行う、マルチ周波数レンジを実行できるソフトウェアも製品化されている。

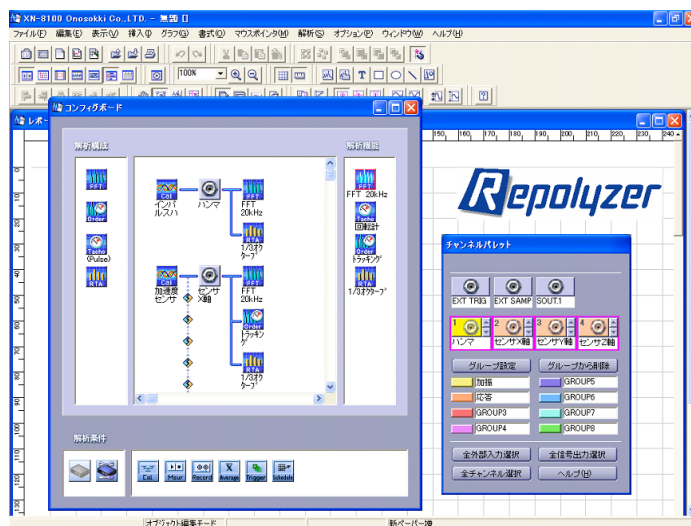
このような最新のソフトウェアでは、FFT アナライザのチャンネルごとに解析機能として、FFT 解析、トラッキング解析などを割り付けるため、ユーザーインタフェースもグラフィカルで解析機能全体を把握しやすく、面倒な校正機能もセンサデータベースなどにより簡単かつ間違いが少なくなるような工夫がなされている。

さらに、計測後は実験報告書などのレポートを作ることも必要なため、レポート作成機能までも含むようになってきている。

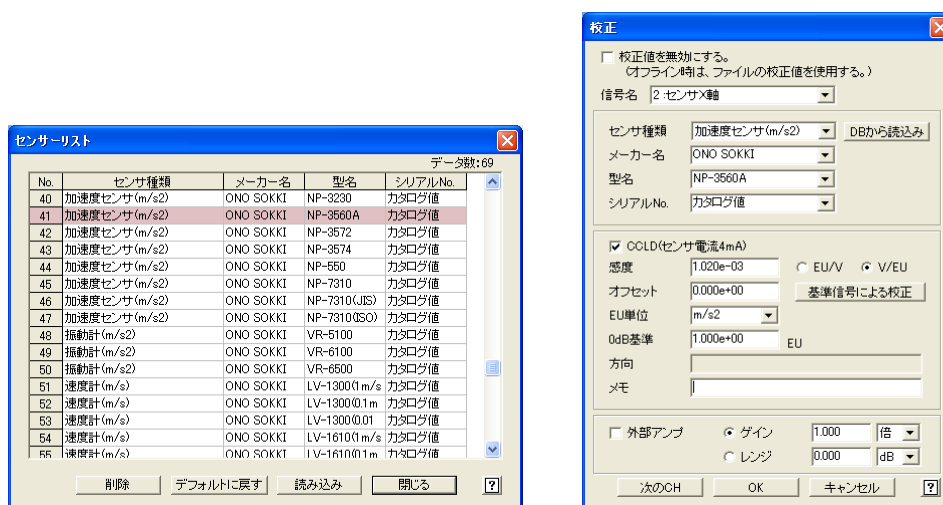
図 2-1-12 に最新のソフトウェアの例（小野測器 レポレイザ XN-8000 シリーズ）を紹介する。



(1) レポート機能、マルチアプリ例



(2) グラフィカルな解析設定



(3) 校正画面

図 2-1-12 最新の FFT 解析ソフトウェア

2-1-6 FFT アナライザを使う場合の一般的な注意点

FFT アナライザを使う上での一般的な注意点を、表 2-1-2 に示す。

表 2-1-2 FFT アナライザを使う上での一般的な注意点

項目	内容	現象	対策他
量子化誤差	A/D コンバータのビット数不足	振幅分解能の不足 波形の歪み	A/D オーバーしない程度に電圧レンジを小さくする
入力オーバー	電圧レンジのフルスケール（最大電圧）をオーバーする。	波形の歪み	レンジオーバー表示を確認する。
エリアシング (折り返し誤差)	サンプリング周波数の半分で高域が折り返される。	スペクトル推定誤差	FFT アナライザは、アンチエイリアシングフィルタを内蔵
リーケージ (漏れ誤差)	時間窓での信号の不連続	偽のスペクトル (サイドローブ)	適切な窓関数の設定
分解能誤差	サンプル点数の不足 周波数分解能の不足	ピークの見逃し ダンピング（減衰） の過大評価	サンプル点数の設定
非線形	対象物が、カタ、摩擦などの非線形	コヒーレンス関数の悪化	線形近似 (平均化の回数)

第2節 ハンマリング試験

2-2-1 ハンマリング試験とは

ハンマリング試験とは、打撃試験とも呼ばれ、対象物をインパルスハンマで加振し、その結果生じる振動を加速度計で検出し、FFTアナライザで計測する試験方法である。対象物の振動的な特性を調べたり、実験モード解析に使う伝達関数（周波数応答関数）の計測を行う場合に、広く使われる試験方法である。

インパルスハンマによるハンマリング試験は、準備が簡単で手軽に行えるため、簡単そうに思われがちだが、実際には奥の深い試験方法である。簡単な方法であるがゆえに、計測者の技術・経験やデータ処理が計測データに大きな影響を及ぼすからである。

実験モード解析の場合、共振周波数（固有振動数）と振動モード形状（固有モード形状）を伝達関数（周波数応答関数）から求める。したがって、計測する伝達関数の精度は、振動モード形状に直接的にかかわってくる。プレテストやプレ解析のように、おおよその振動モード形状を把握するだけならまだしも、CAEと組み合わせて設計にも反映したいとなると、精度のよい計測データや実験解析データを得ることが必須となる。

ここでは、ハンマリング試験や実験モード解析を始める前に、基本的な知識について説明する。

2-2-2 ハンマリング試験の利点・欠点

ハンマリング試験の利点・欠点をまとめると次のようになる。

<利点>

■ 時間が短い

インパルスハンマとセンサを接続するだけで試験開始が可能。

■ 装置が簡単

インパルスハンマ、センサ（加速度計）、FFTアナライザがあればよい。

■ 方法が簡単

加振器で必須となる加振点の固定が不要。

■ 広い周波数帯域を加振できる

インパルスハンマによる加振の特長でもある。

■ 応用範囲が広い

基本的にインパルスハンマで加振できるものなら計測できる。インパルスハンマも大小様々なものが市販されている。

<欠点>

■ SN比が非常に小さい

インパルスハンマによる加振力が瞬間的かつ全周波数帯域に加わるため、加振エネルギー

一が小さい。このため、簡単に実施できるが、加振器を使う場合に比べるとノイズに弱い
ため、計測環境には注意が必要になる。

- ガタや粘性などの非線形性を持つものには、基本的に適さない
- 計測データの精度が、実験者の技術に大きく影響を受ける
- 加振力の大きさ、周波数範囲などの調整がやりにくい

基本的にはインパルスハンマのサイズ、チップの材質で調整することになるため調整し
づらいことがある。

- 低周波の加振が困難

低周波を加振するのに十分なエネルギーをインパルスハンマで対象物に加えるのは困難
である。必要以上に大きなハンマを使用すれば、対象物の変形や破壊につながってしまう。

- ハンマリングにより対象物に損傷を与える可能性がある

2-2-3 インパルスハンマについて

(1) 構造

図2-2-1に、一般的なインパルスハンマの構造を示す。

力センサの出力信号は、グリップエンド部分のBNCコネクタから取り出す。

インパクトチップは、対象物に合わせて各種材質のチップを使い分ける。

エクステンダは、インパルスハンマのヘッドに質量を付加し、加振力を調整することが
できる。

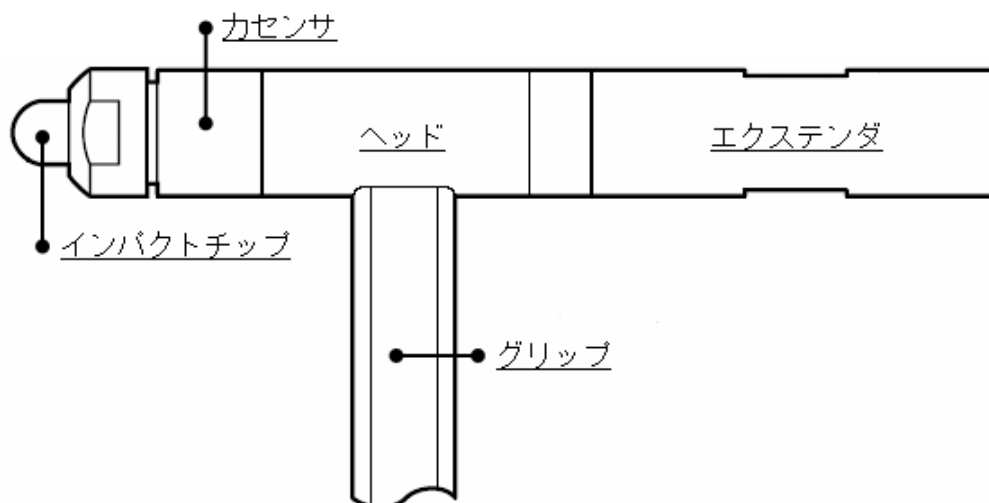


図2-2-1 インパルスハンマの構造

一般的なインパルスハンマは、片手で軽くインパルス加振できる大きさだが、小型の対
象物に対しては、全長10cm程度の小型のものから、大型機械や構造物などを加振できる大
型のものまで様々な種類の製品が市販されている。

図2-2-2のインパルスハンマは、ハンマ長（全長）が約220mm、質量約140gである。小型のものでは、ハンマ長約100mm、質量約10gで非常に小さいものを加振するものや、インパルスハンマのヘッド質量が数kg以上あり、大型機械や船舶などを加振できる製品もある。



図 2-2-2 市販のインパルスハンマの例
(小野測器 GK-3100 : エクステンダ装着状態)

(2) インパルスハンマのチップの選定

インパルスハンマは、プリアンプと力センサを内蔵しており、このセンサはハンマヘッドの打撃端に取り付けてある。

ハンマの打撃端には各種のインパクトチップを取り付けることができる。チップは衝撃力をセンサに伝えるとともに、損傷しないようにセンサ面を保護する。異なる剛性のチップを使用することにより、加振力を調整することができる。

(3) インパルスハンマの加振力の調整

インパルスハンマの加振力調整は、エクステンダとチップを変更して行う。一般に、チップはハンマの衝撃の周波数領域に影響し、エクステンダは信号のエネルギーレベルに影響する。周波数領域とエネルギーレベルは相互に関連するため、ハンマの構造が異なれば、両方が影響を受けることになる。衝撃時のハンマの速度も両方に影響を与える。

一般に、剛性の低い大型構造物の場合は、低周波数域を十分に加振できるように、エクステンダに柔らかいチップを使用する。加振力の調整は、エネルギーと周波数成分の両方に関係しており、ここでは詳細を省略するが、エネルギーと周波数成分とも計測の目的に合わせて調節することが必要となる。

加振エネルギーを調整するには、以下の方法がある。

- 人間が調整（加減）する

- ハンマの大きさ換える
- エクステンダを換える

ハンマやエクステンダの種類は数種類しかないため、細かく調整することは難しいが、人間が調整する（加減する）と加振の再現性（繰り返し精度よく加振できるか）が問題となる。計測者が加振の調整をするには、熟練の技術が必要となるので、できるだけ、ハンマやエクステンダで調整する。なお、ハンマの質量が増えると、加振エネルギーも増えるが、2度叩き（ダブルハンマリグ）しやすくなるため注意が必要となる。周波数成分は、インパルスハンマのチップの選択によって調整することができる。ただし、同じチップでも加振対象物の特性により周波数成分も変化してしまうので注意が必要である。

2-2-4 2度叩き（ダブルハンマリグ）

2度叩き（ダブルハンマリグ）とは、1度目の加振で振動を始めた対象物が、最初の反動で戻ってきたときにハンマと再度衝突してしまう現象のことである。

2度叩きを防ぐためには、ハンマの質量を軽くする、チップを柔らかいものに変更するなどの方法もあるが、それでも初心者では2度叩きとなってしまうことがよく見受けられる。これは、ハンマを手で拘束してしまうことに原因がある。

FFTアナライザには、ダブルハンマキャンセル機能と呼ばれる、ダブルハンマが生じたデータを平均化の回数に加えない機能がある。しかし、計測者の練度が十分でない場合には、結局何度叩いても平均化ができない状態になる。このため、計測の効率を上げるためには、2度叩きをしないハンマリグの技術を習得することが必要となる。

図2-2-3に、2度叩きの例を示す。インパルスハンマによる加振が、FFTアナライザのデータ取り込み中に2回入力されていることを確認することができる。

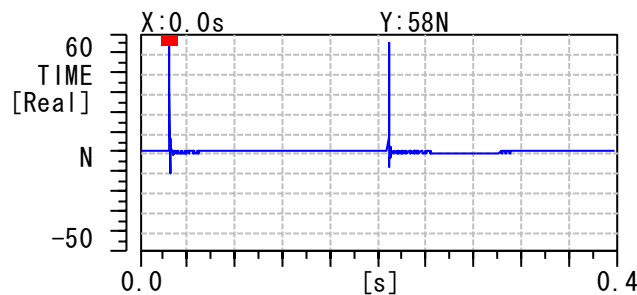


図 2-2-3 2度叩き（ダブルハンマリグ）の例

<注意>

2度叩きの波形に対し、フォースウィンドウ（後述）を掛けて見かけ上2度目の加振を除くことを行ってはいけない。応答には2度目の加振による振動も含まれているため、加振力だけを消すと、周波数応答関数に大きな誤差を含むことになるためである。

2-2-5 窓関数

(1) FFTアナライザの窓関数（ウィンドウ）

FFT（Fast Fourier Transform）は、サンプリングされたデータのうち、ある区間（例えば 1,024 点とか 2,048 点）のデータを処理する。図2-2-4に示すように、波形の一部を切取ることを、「ウィンドウ（時間窓）で波形を切り取る」または「ウィンドウをかける」と呼んでいる。

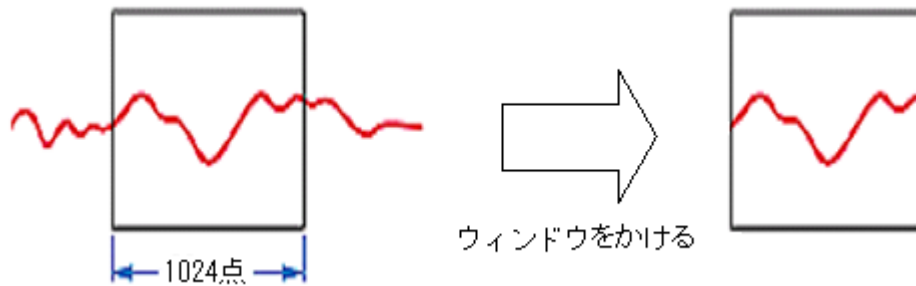


図 2-2-4 ウィンドウの説明

フーリエ変換そのものは無限長のデータに関して定義されている。離散的フーリエ変換（Discrete Fourier Transform）においても同様で、FFT ではウィンドウで波形を切り取り、その区間の波形が無限に繰返されるという仮定で DFT を実行する。

いま例として、図2-2-5に示すように、正弦波をFFT処理する。ウィンドウで切り取られたデータの1フレームの時間長（解析データ長）が正弦波の周期の整数倍であれば、それを無限に繰り返したデータは基の正弦波と全く同一であり、FFTにより得られるパワースペクトルは線（ライン）スペクトルとなる。

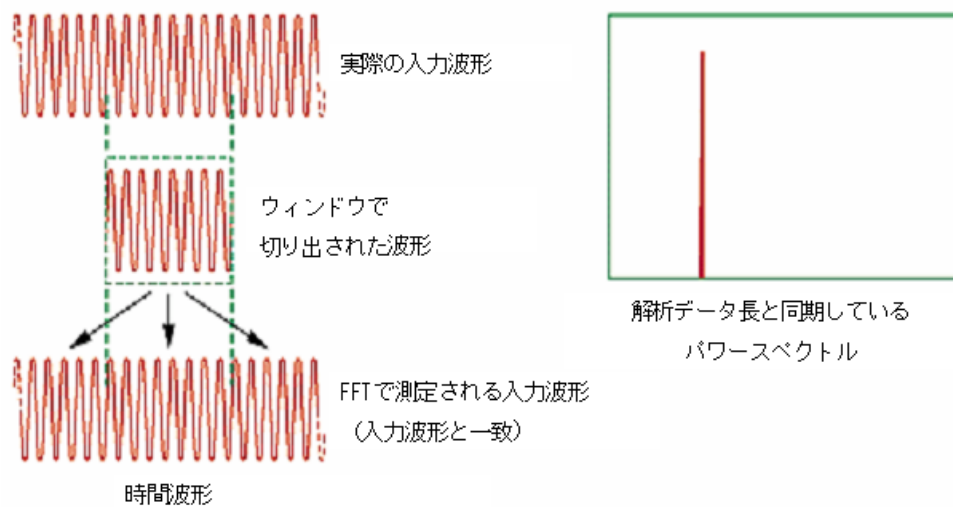


図 2-2-5 解析データ長が入力信号の周期の整数倍の場合

ところが、図2-2-6に示すように、解析データ長が周期の整数倍に一致しない（周波数分解能にあてはまらない場合で、始端と終端が繋がらない）場合は、FFT で仮定される波形は歪んだものとなり、FFT により得られるパワースペクトルにはサイドローブが生じる。つまり、本来単一の周波数でのみパワーをもつ信号であるのに、ウィンドウによる切り出しを行ったためにパワーの漏れが生じたわけで、これをリーケージ誤差（漏れ誤差）と呼ぶ。

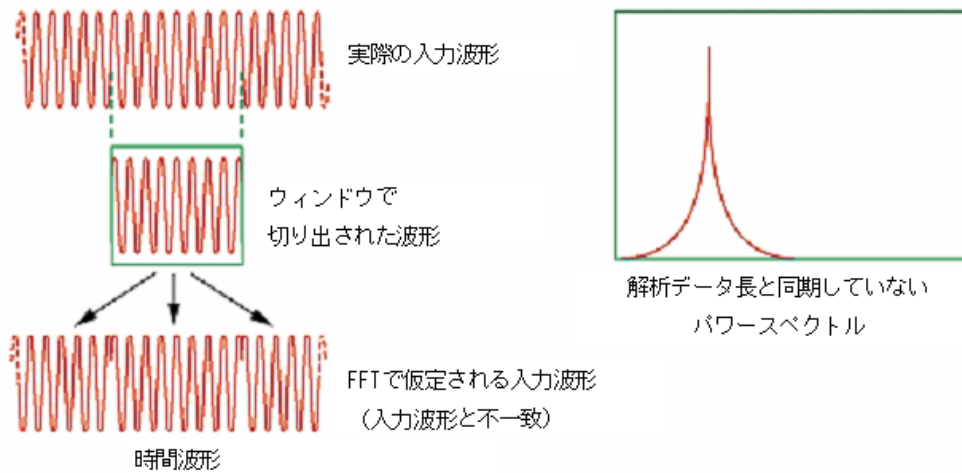


図 2-2-6 解析データ長が入力信号の周期の非整数倍の場合

理論的には、単一のラインスペクトルを得るためには無限長のデータが必要となるが、FFTアナライザでは有限区間のデータで信号処理を行うため、リーケージ誤差が生じることとなる。このリーケージ誤差をなるべく少なくするために、フレームの両端でなめらかにゼロとなるような関数をデータに掛合せると、フレームの始端と終端が繋がり誤差を少なくする。このような関数を窓（ウィンドウ）関数と呼び、窓関数を掛け合わせることをウィンドウ処理という。

図2-2-7に窓関数にハニングウィンドウを適用した場合の例を示す。ウィンドウ処理をしたデータは、フレームの始点と終点でゼロになっているため、リーケージ誤差が減少し、FFT により得られるパワースペクトルの形は、ラインスペクトルに近づく。

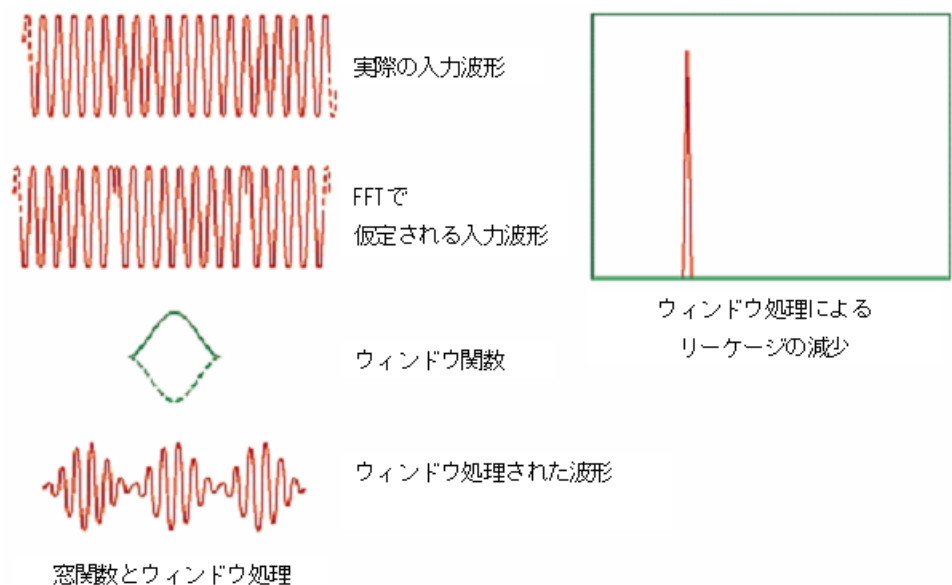


図 2-2-7 ハニングウィンドウ処理後のスペクトル

(2) 窓関数

代表的な窓関数を表2-2-1に示す。

表 2-2-1 代表的な窓関数

種類	周波数 分解能	用途
レクタングュラ	良	インパルス波形などの過渡信号
ハニング	普	一般の連続信号
フラットトップ	悪	高調波分析などレベルを重視する信号
フォース	—	インパルス波形などの過渡信号
指数	—	減衰信号

窓関数による処理により、リーケージ誤差が発生する。周波数レンジ全体のパワーの総和をオーバーオールといい、一般的なFFTアナライザでは、オーバーオールの値は窓関数の補正がなされている。

なお、インパルス試験は手軽に行える半面、誤差が問題となる。この対策としてフォースウィンドウ（力窓）、指数ウィンドウ（指数窓）という2種類の窓関数が有効になる。

以下、代表的な窓関数について説明する。

a レクタンギュラウィンドウ

図2-2-8に示すレクタンギュラウィンドウは、重みづけのない矩形形状のウィンドウで、方形窓または矩形窓とも呼ぶ。

レクタンギュラウィンドウは、重みづけがないためインパルス信号などのように、データの開始と終わりが0となるような信号の場合には、高い精度でスペクトルなどを求めることができる。ただし、連続信号などでは歪み（リーケージ誤差）を生じる。

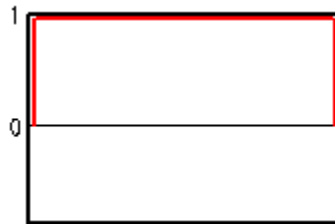


図 2-2-8 レクタンギュラウィンドウ

b ハニングウィンドウ

図2-2-9に示すハニングウィンドウは、連続波形を分析する際に、窓関数として用いられる代表的なウィンドウ関数である。

ハニングウィンドウを使用することにより、サイドロープの影響が小さく、リーケージ誤差の少ないスペクトルを求めることができる。特に高調波成分の検出に有効である。

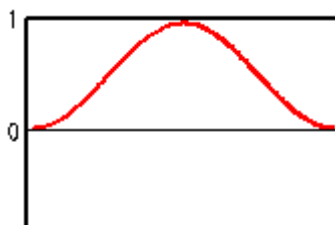


図 2-2-9 ハニングウィンドウ

<注意>

ハニングウィンドウを使用すると信号の一部が削られるため、そのパワーは低下する。ただし、内部でこれを補正し真値を表示している。

c フラットトップウィンドウ

図2-2-10に示すフラットトップウィンドウは、ハニングウィンドウに比べ周波数分解能は落ちるものの、振幅確度が高いという特徴をもっている。

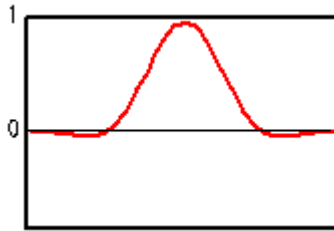


図 2-2-10 フラットトップウィンドウ

<注意>

フラットトップウィンドウを使用すると信号の一部が削られるため、そのパワーは低下する。ただし、内部でこれを補正し真値を表示している。

d フォースウィンドウ

図2-2-11に示すフォースウィンドウは、指定した区間（解析区間）外のデータを強制的に 0 にする窓関数で、「インパルス波形解析時、インパルス波形以外の信号成分を削除するとき」などに、有効なウィンドウである。

下図のように、フォースウィンドウはウィンドウ内の影の部分（a から b）は元の信号のままにし、それ以外のデータは 0 となる。

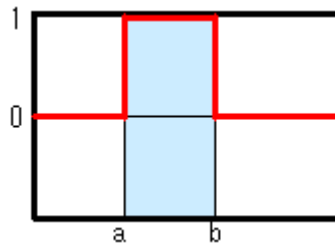


図 2-2-11 フォースウィンドウ

<注意>

フォースウィンドウは、区間外を 0 と認識するので。処理後の信号のパワーは元の信号よりも小さくなる。なお、小さくなったパワーの補正はされない。

e 指数ウィンドウ

図2-2-12に示す指数ウィンドウは、一定の比率（減衰比）で減衰していく関数を用いたウィンドウである。

一般的に信号伝達系にインパルス信号を入力すると、その応答信号は指数的に減衰する。このとき、信号がフレーム内で減衰しきらないと、FFT 処理により分析したとき、連続波形の場合と同様に歪み（リーケージ誤差）を生じる。

そこで、信号に指数ウィンドウをかけ、強制的に 1 フレーム内で信号が0になるように

歪みを低減することができる。ただし、共振特性（スペクトルピーク）に歪みが生じるため注意が必要である。

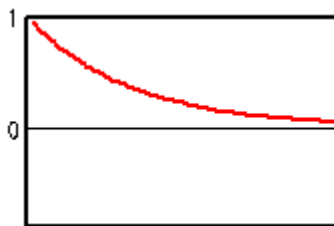


図 2-2-12 指数ウィンドウ

2-2-6 対象物の特性による影響

(1) 対象物の非線形性

ハンマリング試験は、ガタなどの非線形を含む対象物には適さない。これは、ガタなどの非線形性を含む対象物を加振した場合、均一加振や再現性のある計測が困難なためである。このような対象物には、他の加振方法を使った計測を行う必要がある。

(2) 対象物の減衰

対象物の減衰が大きい場合、応答がすぐに消えてしまい周波数分解能が低下する。加振エネルギーが加振点周辺で吸収され、対象物全体を加振するのが難しくなる。

対象物の減衰が小さい場合、共振ピークが急峻になるため、周波数分解能を高くする必要があり、このような場合、FFTアナライザのズーム機能を使用する。

<注意> ズーム機能

通常のFFT解析では、0から周波数レンジまでの範囲をライン数分(例えば800ライン)で解析するが、ある区間を800ラインで分析したい場合があるとする。この場合、ズーム機能によりその区間を拡大することが可能となる。

2-2-7 計測データの確認

ハンマリング試験は簡単に行えるので、良い計測結果も簡単に得られるように思われがちである。しかし、加振系に人が加わり実験者の技術の影響を受けてしまうため、良い結果を得ることは意外に難しいものである。

結果の有効性や計測精度を検証するための指標を以下に列挙する。

(1) コヒーレンス関数（関連度関数）

コヒーレンス関数は、系の入力と出力の因果関係の度合を示すもので、0から1の間の値をとる。1の場合は、その周波数における。系の出力がすべて測定入力に起因していること

を示している。また、0の場合、その周波数における系の出力は、測定入力にまったく関係ないということになる。0～1である場合は、測定とは無関係な信号、系内部で発生しているノイズ、系の非直線性または系の時間遅延などがあると考えられる。

コヒーレンス関数が低下する理由には、以下のようなものがある。

- 加振信号の中に検出できないノイズの混入（フォースウィンドウを使う）
- 応答信号の中にノイズの混入（加振の再現性を向上させる）
- ハンマリングを平均化のために繰り返す中で、加振位置や方向のばらつき
- 応答の漏れ誤差
- がたなどの非線形性の存在

応答信号のノイズ対策には、打撃の再現性を向上させて、平均化回数を増やすことで対応する。ただし、加振信号のノイズは、同じ加振をしていないことになり、正しい平均化にならないため、フォースウィンドウを使用する。

また、反共振点近傍でコヒーレンス関数が低下するが、これは単に応答が小さく信号が誤差に埋もれているためなので、あまり気にする必要はない。ただし、このような場合の反共振点近傍のデータは、モード特性を求めるためには使用しないほうが良い。

（２） 再現性

ハンマリング試験終了後、少なくとも1点は、試験時と同じ加振を繰り返し、結果を比較して再現性を確認する。

これにより、加振中に対象物の構造などが変化していないか、一様に加振できたかどうかを確認することができる。

（３） 可逆性

同じ2点間について、加振点と応答点を入れ替えて、同じハンマリング試験を行い、両者の周波数応答関数（伝達関数）が、一致しているか確認する。

両者のデータが異なる場合には、応答点のセンサ質量が大きい、ガタなどの非線形性がある可能性がある。

（４） 線形性

加振力の大きさを何通りか変えて周波数応答関数（伝達関数）を計測する。周波数応答関数が異なる場合、対象物には振幅に依存する性質があると考えられる。

（５） 他の方法との比較

「結果がおかしい」、「ハンマリング試験が適していない」と経験的に感じる場合には、加振器を使う他の方法と比較することが有効である。

第3節 センサの選定

2-3-1 振動とは

繰り返しになるが、まず、振動について簡単に説明する。

振動はその特性において次の3つに大きく分類することができる。

- 直線振動
- 曲げ振動
- ねじり振動

また、このような振動を定量的に捕らえるためには、一般に次の3つの物理量が使用される。各物理量は、微分や積分をすることでそれぞれ、図 2-3-1 に示すように相互に変換することができる。

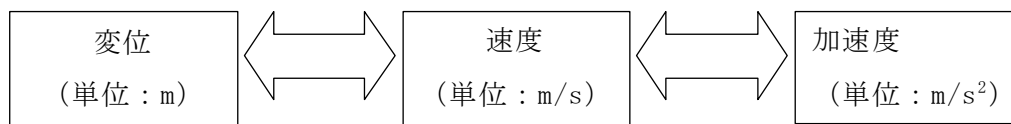
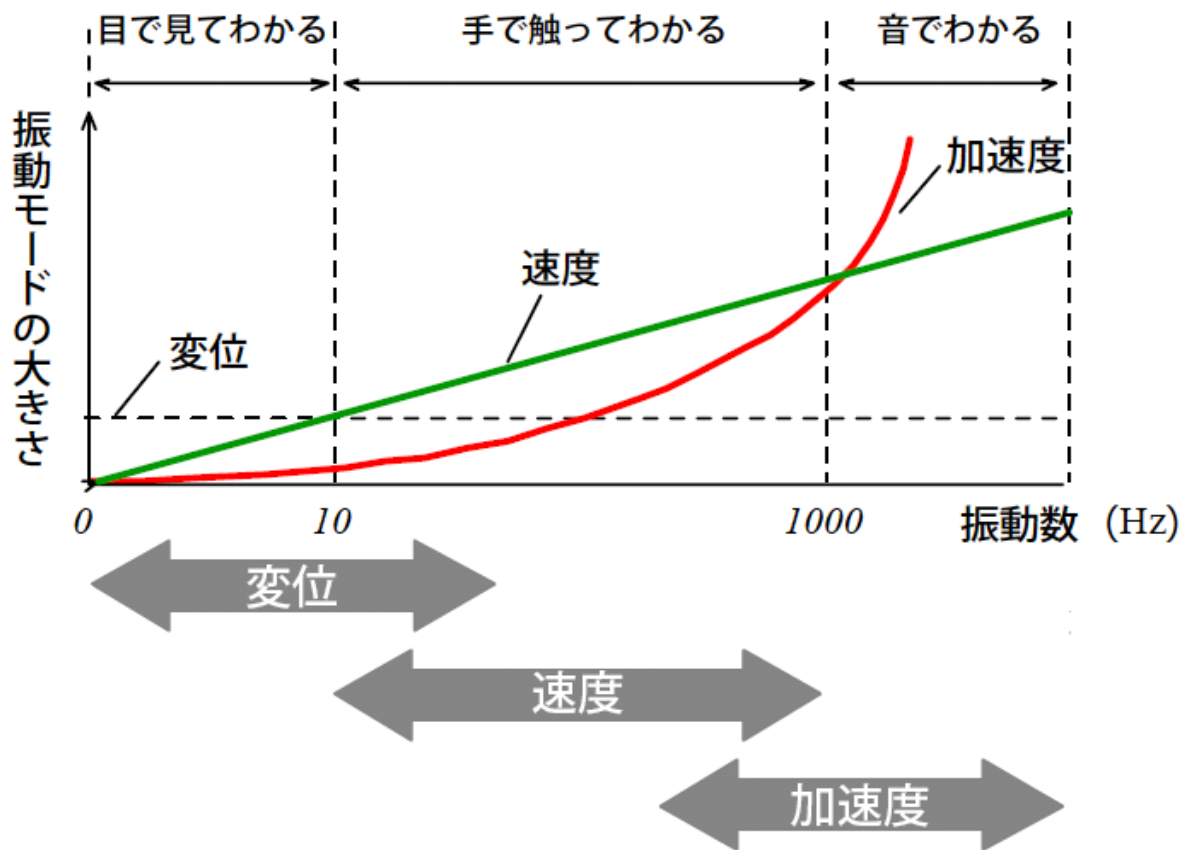


図 2-3-1 変位、速度、加速度の関係

ここで、変位が周波数に対して一定である場合、速度並びに加速度の周波数に対する出力の特性をグラフにすると、一般的には図 2-3-2 のように表わされる。この図から、「周波数の低い範囲では変位の感度が高く、周波数が上がるにつれて速度へ、また加速度へと移って行く。」ことを読み取ることができる。

このことから、周波数の低い場合は変位で、周波数が高い場合には加速度で測定した方が、一般的には感度よく測れることになる。設備診断等では、数百 Hz までは変位や速度で、それ以上の周波数では加速度で測定する。



	変位	速度	加速度
異常の種類	変位量又は動きの大きさそのものが問題	振動エネルギーや疲労度が問題	衝撃力などのように力の大きさが問題
測定対象	工作機械のビビリ現象 弾性軸の高速回転機械	一般の回転機械の振動 ベルト装置などの振動	軸受けの傷振動 歯車の傷振動

図 2-3-2 振動と人間の感覚

2-3-2 センサ選択に当たっての考慮事項

精度よく振動を検出するために適切なセンサを選択するには、次の点を考慮する必要がある。

①対象とする物理量は何であるか

- 変位
- 速度
- 加速度

②測定対象物の大きさ

センサには、接触式と非接触式のタイプがある。接触式センサを使用する場合には、質量効果（後述）について、また、接触・非接触に関わらず、センサの測定必要面積 S と対象とする測定物の面積 S' について考慮する必要がある。（ $S'/S > 1$ でないと正確な計測は不可能である。）

③対象物の振動の大きさ、周波数範囲

測定対象の振動の大きさ、周波数範囲のおおよその目安を求めておく必要がある。ここでの目安を誤ると、場合によっては、センサを破損する可能性がある。

④測定環境

測定対象並びに周囲環境の温度、湿度や、埃、油、水の存在の有無をチェックする。センサの測定方式によって熱に強い・弱い等、得手・不得手がある。

代表的な振動を検出するセンサの種類と測定対象を表 2-3-1 に示す。

表 2-3-1 測定対象とセンサの種類

物理量	測定対象	方式	センサ
加速度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 振動一般 ・ 高周波数帯域 ・ 回転機械の軸受 	接触	圧電式ピックアップ
速度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小型振動体 (圧電素子、光学ドライブ、 磁気ディスク) ・ 回転機械振動 	非接触	レーザードップラー振動計
変位	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低周波数帯域 ・ 回転軸（面）の振れ 	非接触	静電容量式変位計 渦電流式変位計 レーザー式変位計

接触式と非接触式センサの比較を表 2-3-2 に示す。

表 2-3-2 接触式センサと非接触式センサの比較

	接触式センサ	非接触式センサ
方式：検出量	圧電式：加速度 歪みゲージ式：加速度 サーボ式：加速度	渦電流式：変位 静電容量式：変位 光学式：変位/速度
優位点	*比較的安価に計測が可能 *取付け・取扱いが簡単	*振動体に影響を与えない *回転体など接触式では測定できない部位の計測に有効
注意点	質量効果（測定を行うために取付けたセンサの質量により測定対象体の固有振動数が影響を受け変化してしまうこと）	センサに対し除振台を使うなどして、振動絶縁する必要がある。

2-3-3 センサの固定方法による周波数特性の変化

センサを測定対象物に固定する際、どのような方法を取るかによって、図 2-3-3 に示すように、センサの周波数特性が変化する。センサの設置するには、測定周波数範囲に合わせて最適な固定方法で設置することが重要である。

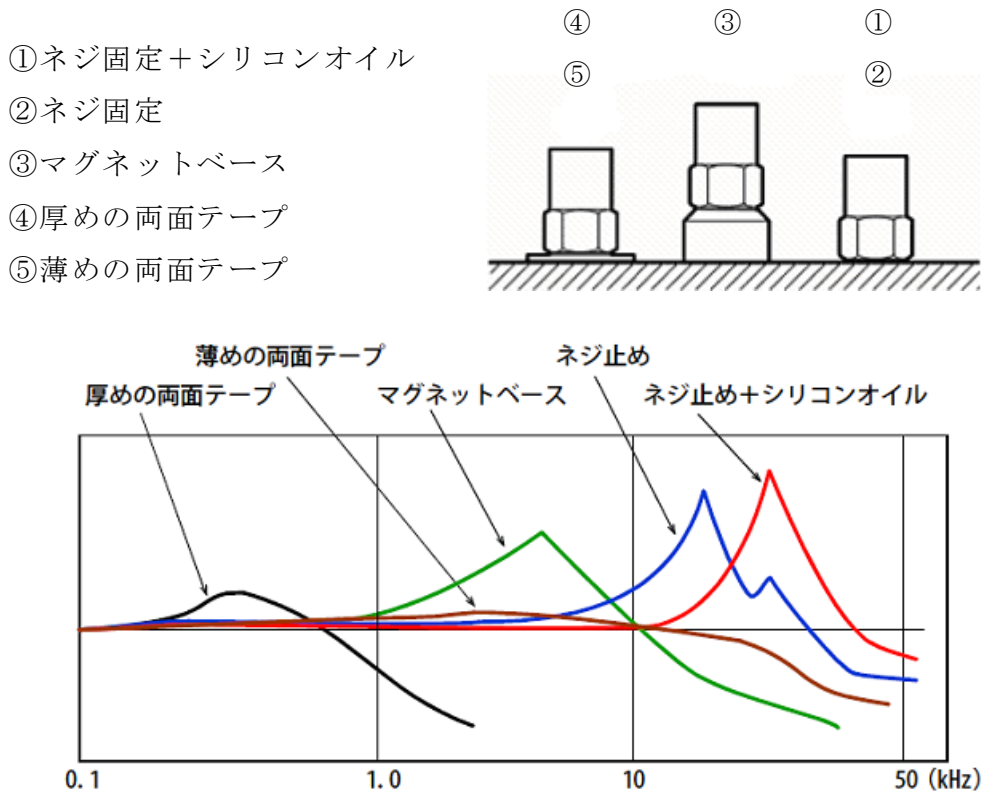


図 2-3-3 センサの取付け方法と周波数特性

第4節 振動計測の手順

振動計測手順は、図 2-4-1 のようになる。以下、順番に説明する。

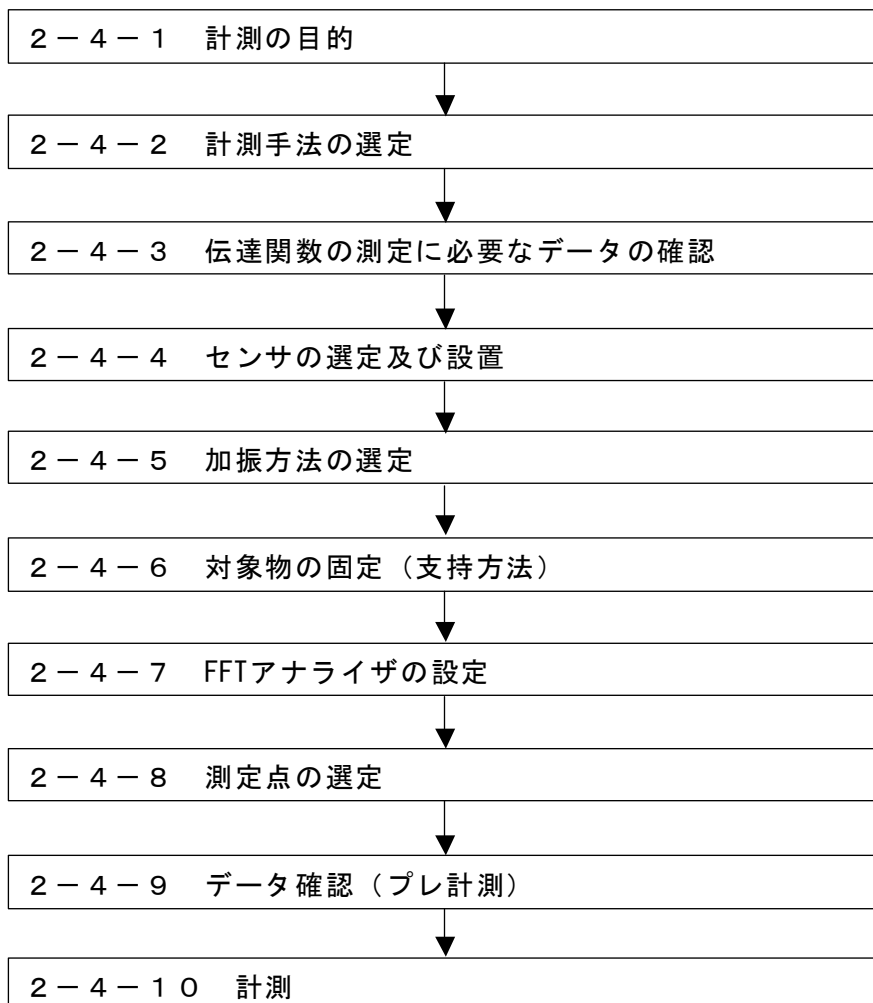


図 2-4-1 計測手順

2-4-1 計測の目的

振動の測定に限らず計測をする場合には、「何のために計測をするのか」という目的を明らかにすることが重要である。例えば、

事例1 実験モード解析を行い、対象物の振動モード形状を確認したい

計測データ：周波数応答関数（伝達関数）

計測方法：各計測点の伝達関数をできるだけ同一条件で計測

FFTアナライザのチャンネル数：最低2チャンネル

事例2 実稼動解析を行い、対象物の実稼動状態での振動を可視化（実稼動アニメーション）したい

計測データ：パワースペクトル、クロススペクトル

計測方法：多点の同時計測

FFTアナライザのチャンネル数：測定点の数だけのチャンネル

事例3 対象物の周波数的な特徴を調べたい

計測データ：パワースペクトルなど

FFTアナライザのチャンネル数：1chでも可能

事例4 減衰など材料特性を調べたい

計測データ：周波数応答関数（伝達関数）、時間軸波形、ズーム解析

FFTアナライザのチャンネル数：2ch

事例5 様々な周波数解析をしたい

例えば、ある振動現象の原因究明をする場合に、DATや最近のFFTアナライザのスループットディスク機能を使ってデータを収録した後、後解析で周波数レンジなどの解析条件を変更するなど、多面的な周波数解析を行うこともある。

以上のように振動計測には、様々な目的がありそれに応じた計測データが必要になる。事例1や事例2のように計測の目的が定まっていれば、計測は単純かと言えば、そうではない。一例であるが、解析周波数レンジをどの程度に設定するかは、計測対象の固有振動数と何のためのモード解析か、ということに影響を受けるからである。いたずらに解析周波数レンジを高く設定すると、周波数分解能が不足し、低い周波数の振動モード形状を精度よく求めることが難しくなることもある。

事例3の場合は、解析条件を様々に変更しながらデータを見て、傾向をつかむような作業をすることになるので、解析条件の変更がしやすいということが、計測を実際

行ううえでは重要になってくる。

事例 4 の場合は、センサの設置、加振方法、FFT アナライザの特殊な機能を使うなど、計測のための準備や実際の計測についての知識や経験も重要になる。

事例 5 の場合は、実験の制約等で計測が 1 回限りの場合、再現性が低い場合、同じデータの解析条件を様々に変更して解析したい場合などに望ましい方法である。

ここでの計測の目的は、「実験モード解析による振動の可視化」なので、FFT アナライザによる計測データとしては、伝達関数（周波数応答関数）が必要になる。

2-4-2 計測手法の選定

計測手法は、周波数領域と時間領域に分けられる。周波数領域の代表的な関数には、パワースペクトル、周波数応答関数、コヒーレンス関数などが、時間領域には、時間波形があり、それぞれの関数を計測の目的に応じて使い分ける。

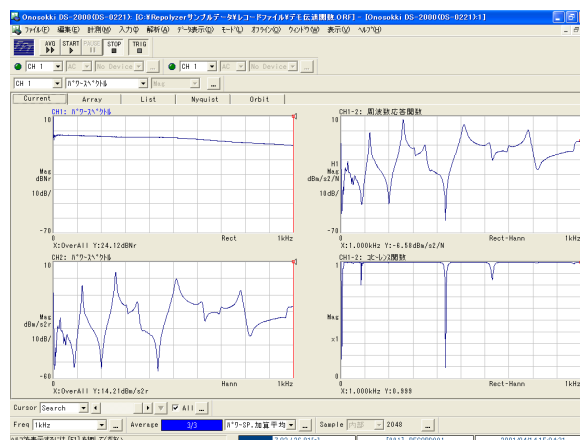
実験モード解析に必要な計測データは、伝達関数（周波数応答関数）である。FFTアナライザを使って伝達関数を測定するには、加振器を使う方法もあるが、ここでは、インパルスハンマと加速度計1個を使った方法を例に、以下説明する。

図 2-4-2 に、実験モード解析に必要な計測機材を示す。



FFT アナライザ	: 小野測器 DS-2000 シリーズ <Graduo>
FFT 解析ソフトウェア	: 小野測器 DS-0221
インパルスハンマ	: 小野測器 GK-3100
加速度計	: 小野測器 NP-3211

(1) 計測システム



(2) FFT 解析ソフトウェア

図 2-4-2 計測に必要な機材

2-4-3 伝達関数（周波数応答関数）の測定に必要なデータ

実験モード解析に必要なデータは、伝達関数（周波数応答関数）があればよいが、正しく計測できたかどうかを確認するためには、以下の計測データを FFT アナライザでモニタ（監視）する。ここでは、伝達関数の測定時に観察する計測データ（FFT アナライザの関数）として、時間軸波形、パワースペクトラム、周波数応答関数、コヒーレンス関数について、簡単に説明する。

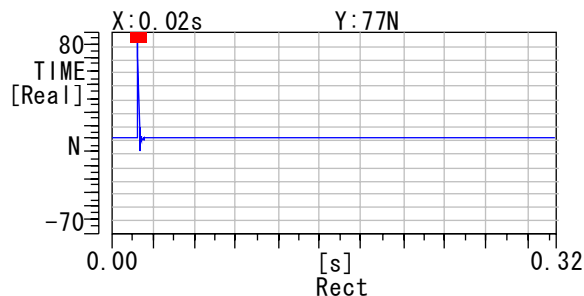
（1）時間軸波形（1 ch、2 ch）

センサ（ここではインパルスハンマと加速度計）の信号レベルと FFT アナライザの電圧レンジが適正かどうか判断することができる。

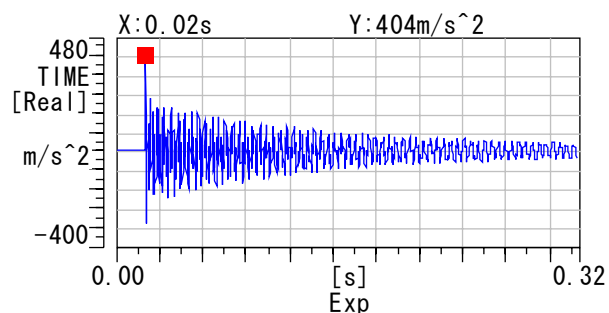
伝達関数の計測では、インパルスハンマを使って同じ大きさ（FFT アナライザに入力される電圧のレベル）で加振できているかどうか（再現性）を確認する。

また、ダブルハンマをした場合も確認することができる。（FFT アナライザには、ダブルハンマをキャンセルする機能が内蔵されている。）

加速度計の方は、インパルスハンマで加振された結果、対象物の振動の大きさ（FFT アナライザに入力される電圧のレベル）と振動が減衰していく状況を確認する。特に、振動の減衰状況は、計測時間（FFT アナライザの取り込み時間）にも影響を与えるため、後に述べる窓関数の設定も必要になる。図 2-4-3 に時間軸波形の例を示す。



（1）チャンネル1 インパルスハンマ



（2）チャンネル2 加速度計

図 2-4-3 時間軸波形の例

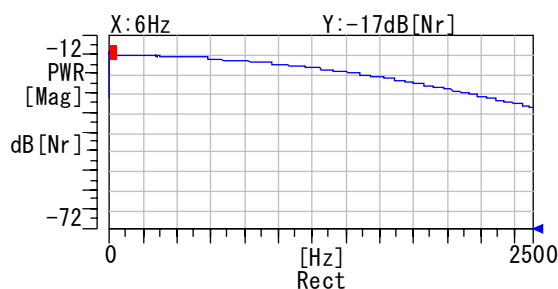
(2) パワースペクトラム (1 ch、2 ch)

インパルスハンマのパワースペクトラムは、設定した周波数レンジの中で何 Hz ぐらいまで加振できているかを確認することができる。解析に必要な周波数までフラットに加振できていることが望ましく、そのためにインパルスハンマのヘッドに対する付加質量 (エクステンダ) の追加やインパルスハンマのチップの変更などを行う。

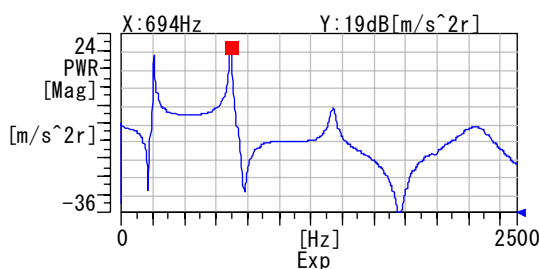
一般に、高い周波数になるほど加振エネルギーが不足するので、ハンマリングによる加振が回数によらず均一に加振できているかに注意する必要がある。

対象物によっては、振幅依存性と呼ばれる、加振力によって応答が変わるものもあるが、この場合でも同一条件で加振することにより、振幅依存性の影響を小さくすることができる。

応答点 (加速度計) との関係では、加振点とセンサ取り付け位置が最も遠い位置関係にある場合においても、十分な加振力が得られている (応答点のパワースペクトラムの観測ができる) ことが重要である。すなわち、応答点を何箇所か選んで、一定の加振力で全ての応答点において必要なパワースペクトラムを観測できることが大切である。特に計測ポイントが多い場合には、実験モード解析では、実際の計測点よりも少ないポイントのデータで振動モード形状を確認したほうが、失敗を防ぐことができる。(ここでは、説明を省くが、MIMO と呼ばれる方法を使う場合もある。大規模な実験モード解析を行う場合や 1 箇所の加振では十分な加振力が得られない場合などに使われる。) 図 2-4-4 に、パワースペクトラムの例を示す。



(1) チャンネル 1 インパルスハンマ



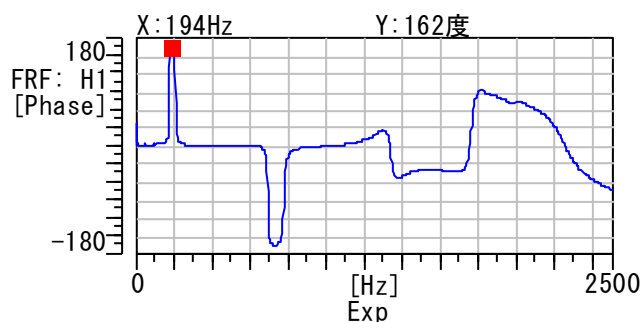
(2) チャンネル 2 加速度計

図 2-4-4 パワースペクトラム

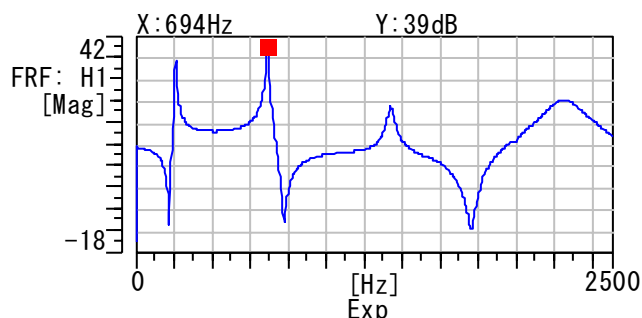
(3) 周波数応答関数 (Mag と位相、REAL/IMAG)

応答点／入力点のデータである。平均化処理をすることで、データ精度を高めるだけでなく、正しく計測できたかどうかを周波数領域で確認することもできる。ちなみにボード線図とは、周波数応答関数の位相特性とゲイン特性を1枚のグラフにまとめたものである。

図 2-4-5 に、周波数応答関数の例を示す。



(1) 位相特性



(2) ゲイン特性

図 2-4-5 周波数応答関数(伝達関数)

(4) コヒーレンス関数

平均化をした場合、1回目と2回目以降のデータの相関をみて、同じようにデータがとれたかどうかを確認することができる。なお、コヒーレンス関数は、その性質上平均化をしないと意味が無く、コヒーレンス関数を測定する場合は、必ず平均化を行う必要がある。図 2-4-6 に、コヒーレンス関数の例を示す。

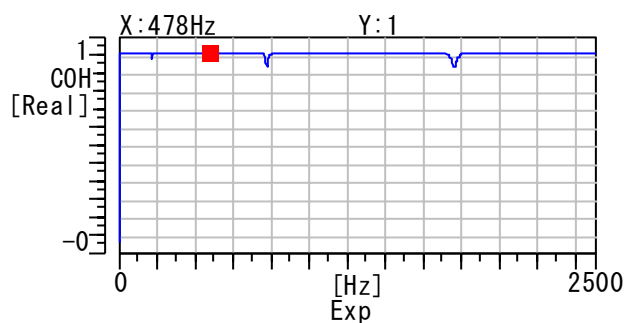


図 2-4-6 コヒーレンス関数

2-4-4 センサの選定及び設置

センサを測定対象物に固定する際、どのような方法を取るかによってセンサの周波数特性が変化する。詳細は、第3節で説明したとおりである。

加速度ピックアップの選定と固定法についてまとめると、以下のようになる。

- 測定試料に対して十分に軽く、小さいものを選択する

（加速度ピックアップを取り付けること自体が、測定試料の固有振動に少なからずとも影響を与える。）

- センサケーブルの取りまわしなどにも注意する

センサケーブルが対象物に接触して、減衰が変化する。

インパルスハンマで加振したときに、ケーブルに接触してセンサの固定条件が変化し、計測データに影響がでる。

センサの固定方法の一般的な長所・短所を表 2-4-1 に示す。

表 2-4-1 センサ固定方法の長所・短所

	長 所	短 所
ワックス	接着が簡単	接着度が弱い、熱に弱い 高域の周波数まで検出不可能
マグネット	固定が簡単	接着度対象が限定される
瞬間接着剤	固定が簡単 多種素材へ接着可能	測定試料を汚しやすい 取り外す際に、センサを破壊しやすい
ネジ	堅固な固定が可能	測定対象にピックアップ固定用のネジ 穴を開ける必要がある

2-4-5 実験モード解析のための加振方法の選定

(1) インパルスハンマによる加振方法

インパルスハンマは、構造物の振動モード解析用に FFT アナライザとともに使用する。

実験モード解析に使う伝達関数（周波数応答関数）の計測には、インパルスハンマを使った加振試験を行う。対象物をインパルスハンマで加振し、その結果生じる振動を加速度計で測定する。

インパルスハンマによる計測手順は、加振点移動法と応答点移動法の2つの方法がある。以下、図 2-4-7 を使って説明する。

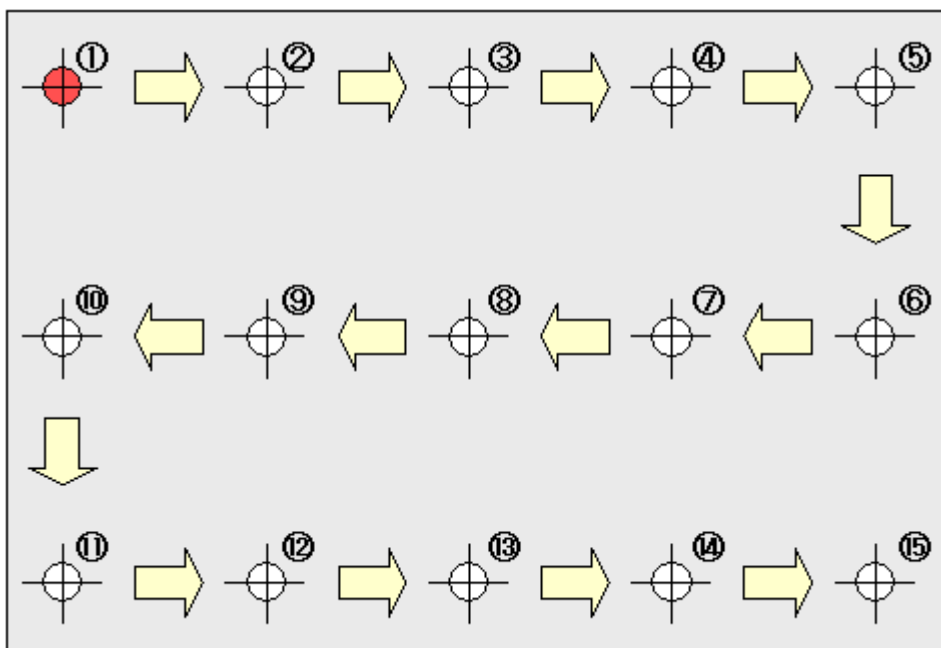


図 2-4-7 加振点移動法と応答点移動法の説明

a 加振点移動法

計測点の1箇所に加速度計を固定し、他の計測点を順次加振する方法である。

例えば、図 2-4-7 において点①にセンサを取り付け、インパルスハンマで、点①から②、③・・・⑮まで順次ハンマリングを行う。

b 応答点移動法

加振点を測定点の1箇所に固定し、加速度計を他の計測点到順次移動させる方法である。

例えば、図 2-4-7 において加振点を点①に定め、センサ設置点を点①から②、③・・・⑮まで順次移動し、ハンマリングを行う。

(2) インパルスハンマの選定・調整（サイズ、チップ）

インパルスハンマによる衝撃力（加振エネルギー）は、幅広い周波数範囲にわたり、ほぼ一定の力からなるので、その周波数範囲にあるすべての共振を起こすと考えられる。

衝撃力の振幅と周波数範囲（波形）はハンマのサイズ、長さ、材料および衝撃時の速度によって決まる。また、一般に周波数範囲は、衝撃キャップの材料によって決まり、エネルギーの大きさはハンマの質量と衝撃時の速度によって決まる。

実験モード解析における加振力の周波数帯域の調整手順について以下に説明する。

①ハンマで試験対象を叩き、FFTアナライザで平均化処理を行う。

- ノイズの影響を減らすため、必ず数回の平均化処理を行う。

②測定結果を見て、以下のチェックを行う。

- 信号が適切であったか（SN比が十分かどうか）
- 飽和現象（FFTの入力オーバーレンジや、ピークが一定時間平らになる）がないか
- 加振計測中は、ときどきエクステンダやチップの接続部をチェックする。接続部が緩むと、信号が不安定化やノイズの増加などがおこる。

③加振周波数帯域を確認する。

- インパルス波形の周波数波形（パワースペクトラム）を見て、対象物の共振周波数をカバーしているかどうか

④必要に応じチップやエクステンダを変更する。

- より高い周波数の応答が必要な場合、より硬いチップを使用し、エクステンダは使用しない。
- 低周波数の応答をより良くするには、より柔らかいチップを使用し、エクステンダを装着する。
- 運動の信号エネルギーを大きくするには、衝撃の速度かハンマの質量を大きくする。

(3) インパルスハンマの使い方

第2節で説明したとおり、インパルスハンマを使った場合の加振力調整は、エクステンダとチップを変更して行う。

ここでは、インパルスハンマの使い方について説明する。

ハンマリング試験は、計測実施者がインパルスハンマで対象物を加振する。つまり、加振系に人が含まれているため、加振器を使う場合に比べ人の技量や経験が加振の良否に大きく影響する。以下に注意点を示す。

<加振時>

- ハンマはやわらかく軽く支える
- 人の力で叩くのではなく、ハンマの質量を利用して加振することが重要
- 叩き方は、できるだけ様に一定にし、力の調節はハンマ側で行う
- 手はハンマに初速度を与えるだけとする
- 手で力を加えると加振が乱れ同じような加振ができない

<加振点及び方向>

- チップの先端は、面積があるので、チップ中心が加振点に一致するようにすること
- 加振点の位置決めは、事前にきちんとしておくこと（加振点のマーキング）
- 加振方向は、ハンマの力センサの向きと一致させること
- ハンマが、対象物表面の法線方向から10度以上傾かないこと
- 特にエクステンダ装着時、手を含めた加振系で回転運動とならないようにすること

<加振の瞬間>

- 加振の瞬間、ハンマが浮いた状態にあること。手で拘束しないこと
- インパルスハンマが対象物を叩くのと同時にすばやく引く
- 当てるよりも引く方に意識を集中すること

<加振エネルギーを叩き方で調整する場合>

- 人が力の大きさを変えると、熟練者でも再現性を保つのが難しいので極力避けること
- 単に衝突速度を変えるだけで、叩く手の力を変えないこと

2-4-6 対象物の支持方法

(1) 対象物の支持の重要性

振動計測をするためには、対象になる機械や構造物などを何らかの方法で固定する必要がある。対象物の固定（支持）方法については、あまり触れられないことがないが、計測結果に大きな影響を与えるので、目的に合わせ対象物の支持方法をきちんと決める必要がある。

例えば、インパルスハンマを使って計測対象を加振する場合、対象物の支持状態により結果が異なったものになることがある。後に紹介するバットの実験モード解析でもグリップエンド部分を吊るして自由支持とする場合と、グリップエンド部分を固定した場合とでは、得られる振動モード形状が異なってくる。また、加振ごとに支持条件が変化してしまうような場合には、計測データの精度や解析結果にも影響を与えることもある。

振動計測においては、計測条件だけでなく、どのような状態で加振したのかも含め記録として残しておくことにより、再計測（再実験）や解析の際に利用することができる。今ならばデジタルカメラを利用するなどして、対象物を含む全体の写真、加振方法、支持部（固定部）の写真などを残しておくという方法もある。

対象物の固定条件は、自由、固定、弾性支持の3つに分けることができる。以下、それぞれについて説明する。

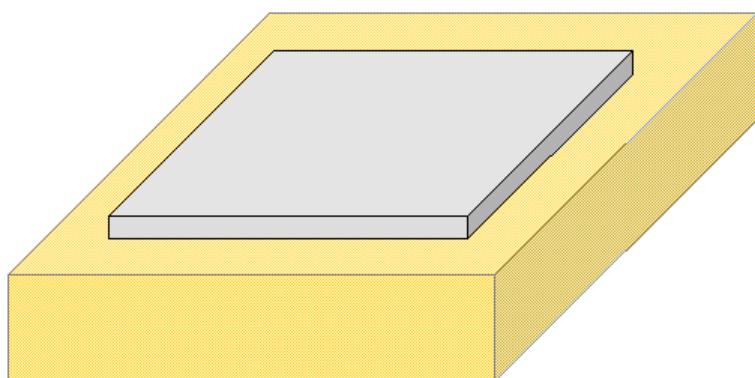
(2) 自由支持

自由支持とは、理想的には空間に浮かんだ状態で対象物が自由に動ける状態を指し、CAE では簡単に設定できるが、実験では重力の影響で実現することができない。しかし、実用的なレベルでは、比較的簡単に CAE などの境界条件自由の状態を再現することができる。

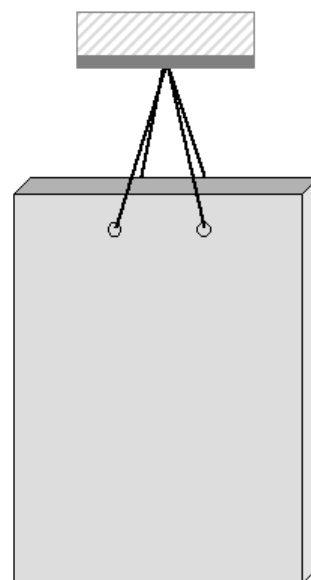
自由支持とは、図 2-4-8 に示すように、対象物を吊ったり、空気バネを使ったり、ウレタンのようなスポンジ状の物の上に乗せたりする方法である。

このときの注意点を以下に示す。

- 対象物を支持する物は、できるだけやわらかいものを選ぶこと
- 計測データ（伝達関数）では共振周波数に見えるが、実験モード解析で振動モード形を見ると変形しないモードがあるが、これは剛体モードであり、固有振動数での振動モード形ではないことに注意すること
- 対象物に対して付加される質量や減衰の影響をできるだけ小さくすること
- 計測が安定してできるように対象物を支持すること
- 吊った場所やスポンジなどとの接触点が、固定のような特性を示す影響があるので、計測データ及び振動モード形状を見る際には、この点を考慮すること



(1) ウレタン上に置く



(2) 吊る

図 2-4-8 自由支持の例

(3) 固定支持

CAEなど理論解析では、対象物の固定点の自由度をゼロにするだけで、固定支持を簡単に実現できるが、実験での実現は、難しいため自由支持ほど一般的ではない。

実計測で固定支持を実現するためには、質量と剛性が非常に大きい（理論的には無限大）物体に、対象物が一体になるよう溶接して取り付ける必要がある。しかし、この方法は現実的には無理であるため、基礎や定盤のような物体にボルト締めをした状態を固定支持とみなしたりする。この際の注意点を以下に列挙する。

- 基礎の一部または全体が、対象物と一緒に振動し付加質量としての挙動を示す。
- ボルト固定をして見掛け上は剛性が高そうでも、振動的には剛性の不足や接触面の粗さなどの影響による局所的な支持になる場合がある。実験モード解析をすると完全固定になっていないことを確認できる。
- 接触面では締め付けと直角方向の剛性が低下する。
- 基礎の弾性振動の影響により、主に高周波で連成振動が発生することがある。

このように、固定支持は自由支持よりも実現が困難であるため、振動計測では極力固定支持を避け、自由支持をする方が望ましい。

例えば、吊るしの状態を自由支持と近似することは可能でも、大きい基礎に対象物を設置したから固定支持になるとは限らない。

また、自由支持の結果から固定支持の結果を導くことは、自由支持の振動試験の結果から自由度を減らすことなので実現可能であるが、固定支持の結果から自由度を増やすことはできないという側面もある。

(4) 弾性支持

弾性支持は、対象物に対しバネなどを介して固定する方法である。設置方法が難しい（構造的に複雑になる）ので、積極的に弾性支持を再現することは少ないようである。ただし、実際の対象物が、構造上弾性支持のような固定方法になっている場合はあり、実験モード解析をする上では、バネにより対象物が拘束されるので、自由振動だけでなく強制振動の要素も含まれることに注意が必要となる。

2-4-7 FFT アナライザの設定

インパルスハンマと加速度計を使って伝達関数を計測する場合の、FFT アナライザの主な設定項目を以下に示す。

① センサの設定

インパルスハンマ、加速度計から振動を検出できるようにする。

校正：感度設定、単位名を入力する。

② 電圧レンジ

対象物をインパルスハンマで一定の加振をしながら調整する。

③ 周波数レンジ

対象物の共振周波数の数から、適当な周波数レンジに調整する。

計測時間（取り込み時間）、周波数分解能も考慮すると効率的な計測ができる。

④ 窓関数

信号の種類（形状）に応じた窓関数を選択する。

⑤ 平均化処理

実験のばらつきの影響を抑えるため、平均化処理を行う。

2-4-8 測定点の選定

実験モード解析においては、観察したい振動モード形を表現できるだけの計測点数が必要となる。図 2-4-9 に、各種支持方法（両端自由、片端固定、両端固定）による 1 次から 3 次までの振動モード形を示す。

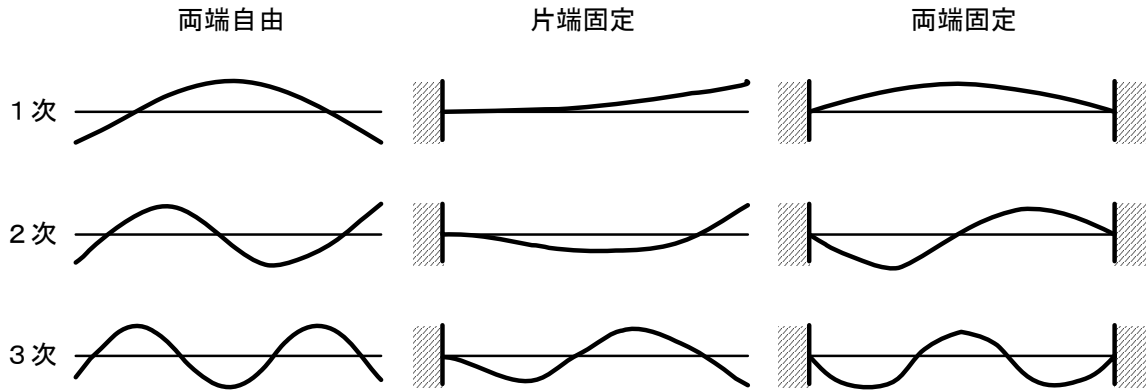


図 2-4-9 各種支持方法と振動モード形

計測点数は、最低でも振動モード形状を表現できるだけの点数が必要となる。支持方法と最低必要な計測点の関係を、図 2-4-10 と表 2-4-2 に示す。実計測では、完全固定は難しいため、固定端も計測点として含めている。

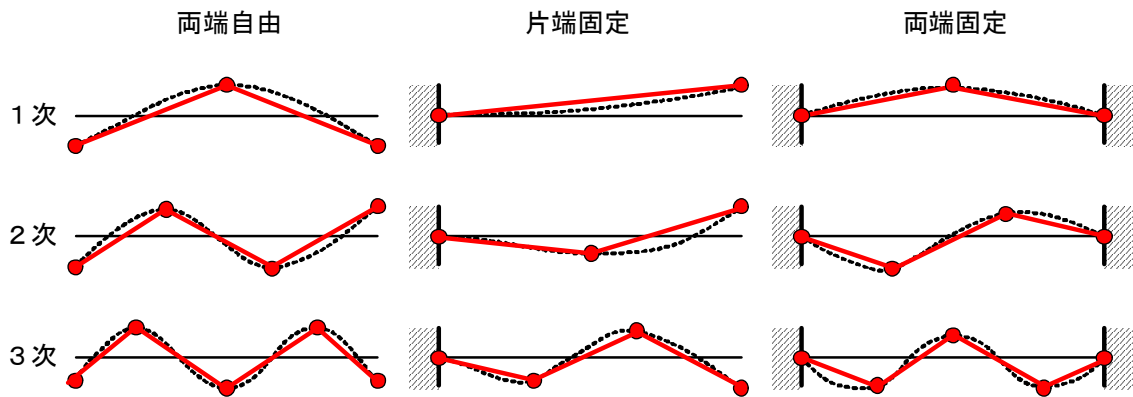


図 2-4-10 振動モード形状と計測点

表 2-4-2 振動モード形状と最小計測点数の関係

次数	両端自由	片端固定	両端固定
1	3	2 (固定端含む)	3 (固定端含む)
2	4	3 (固定端含む)	4 (固定端含む)
3	5	4 (固定端含む)	5 (固定端含む)
N	N+2	N+1	N+2

次に、面のモード形状は、梁のモード形状を平面に拡張するように考える。平面の振動モード形の例を図 2-4-11 に示す。平面振動モードは、X・Y 方向の振動モード形を組み合わせで見ている。ここでは、X 方向の振動モード形が 1 次で、Y 方向の振動モード形が 3 次の場合には、1-3 モードと呼んでいる。

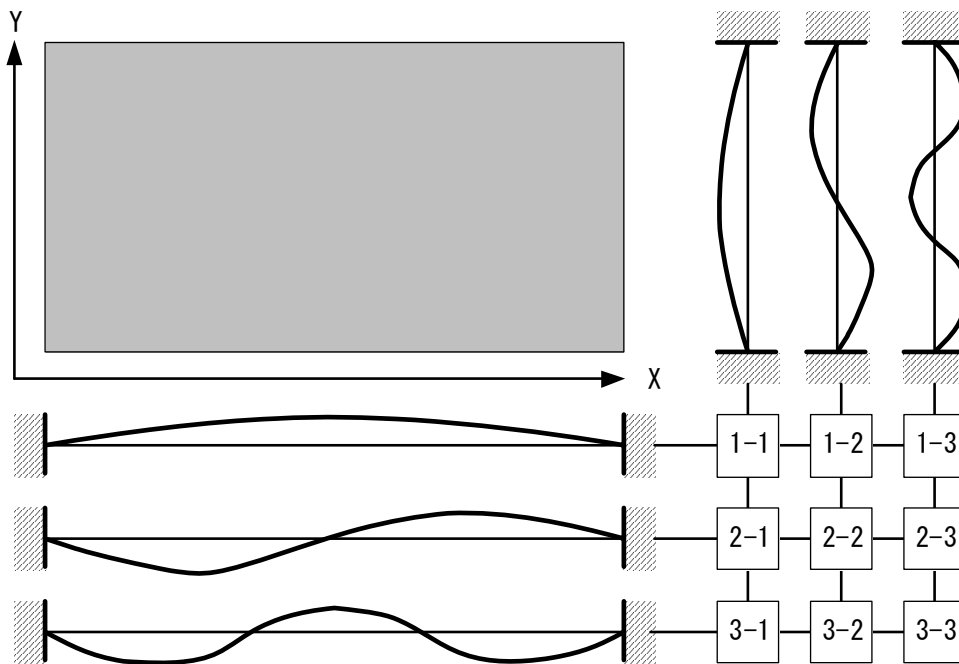


図 2-4-11 平板の振動モード形と計測点の関係

基本的には、以下の考え方を応用して、計測点数を決めることになる。

- ①測定点は多いほどきれいな振動モード形状を得ることができるが、計測時間だけでなく計測の難易度（同じように加振する）も高くなるため、全体の振動モード形状の傾向をつかんでから、測定点数を進める方が結果的には効率よく計測及び解析を進めることが可能となる。
- ②多数の振動モード形状を確認したい場合には、伝達関数を計測する周波数範囲を広く（共振周波数の数を多く）設定し、計測点数を減らして対象物がどのような振動をしているのか（振動モード形状を持つのか）を全体的に把握したのち、より詳しく観察したい周波数範囲の計測点を増やして解析するようにする。
- ③問題となる（解析したい）周波数が分かっている場合には、その周波数の前後の共振周波数を観察するので、その付近の共振周波数が低い方から何個目かで、測定点をどの程度細かくするかを決めることができる。

なお、対象物をハンマリングする際、振動モード形の節を加振した場合には、その振動モード形の共振周波数（固有振動数）は計測できないことに注意が必要となる。

2-4-9 データの確認（プレ計測）

測定点を決めるために、まずは振動モード形状を大雑把でもつかむことが重要である。特に高次モードを観察したい場合には、あらかじめ振動モード形状の傾向をつかんだ後、特に観察したい部分の測定点を増やすことにより、全体のモード形状と観察したい部分の振動状態を把握しやすくなる。

ここでは、インパルスハンマによる加振方法を取っているが、測定点が数百点になるような場合や同一形状の部品を繰り返し計測する場合などには、加振器の利用やセンサを自動的に移動させるトラバース装置の使用が有効となる。

データが正しく取れているかどうかは、伝達関数の計測では、

- インパルスハンマの時間軸波形
- 加速度計の時間軸波形
- インパルスハンマのパワースペクトラム
- コヒーレンス
- 平均化の具合：例えば3回目の加振をしたら急にスペクトラムの形状が乱れた

などにより確認することができる。

この他にも実際の計測では、打音や加振時の感触などでも、うまく加振できているかどうか判断することができる。

いずれにしろ、計測の練度向上（うまくインパルスハンマで加振できる）に伴い、効率よく計測を進めることができるようになる。

なお、実験モード解析用に伝達関数を計測した場合に、一様に加振できたかどうかの確認は、1回目の伝達関数と、全ての測定点の計測が終わった後、再度1回目の測定点の伝達関数を計測し、これを1回目の計測データ（もしくは既に計測した複数の計測点のデータ）と比較することにより、確認することができる。最後の測定点と同じように加振できていることが重要である。この方法で、一定の加振ができたかどうかを簡単に確認することができる。

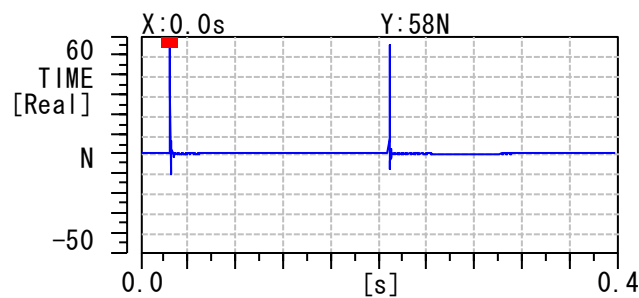
2-4-10 計測・解析

実際のFFTアナライザを使った設定及び計測については、第5節で説明する。

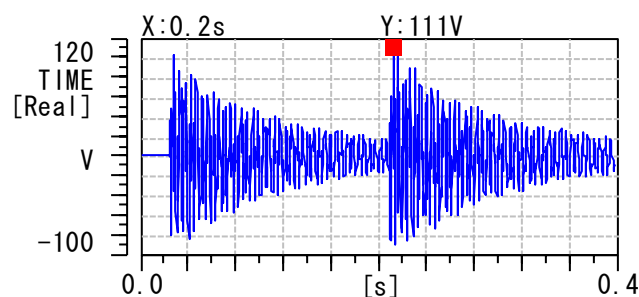
平均化の回数は、ノイズの少ない良い環境であれば3～5回程度で十分だが、通常の計測現場などでは、もう少し多くする。

続けて加振する場合には、応答が干渉しないように、前回の加振による応答が十分減衰してから次の加振を行う。減衰の小さい対象物の場合には、計測終了後対象物を手で触れて前回の加振による応答を完全に消してから、次の加振試験に移る。

図2-4-12に、ダブルハンマリングの例を示す。なお、ハンマリング試験において、特に対象物の減衰が小さい場合には、振動が収束するまでに時間がかかるため、平均化の際には、一度対象物に手を触れるなどして対象物の振動状態を抑えてから、次の計測に移るとよい。



(1) インパルスハンマの時間軸波形

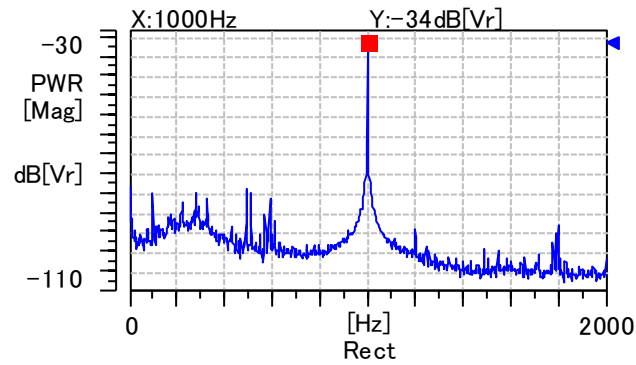


(2) 対象物の時間軸波形

図2-4-12 ダブルハンマリングの例

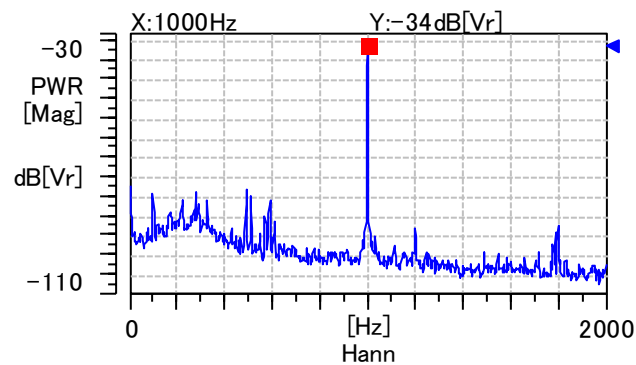
図 2-4-13 に、1kHz のサイン波を入力した場合の窓関数によるパワースペクトラムの比較例を示す。レクタングュラの場合、フレームの両端が不連続になり、1kHz のピークの裾野が広がっていることを確認できる。

CH. 1 FFT RECT(FFT)



(1) レクタングュラの場合

CH. 1 FFT HAN(FFT)

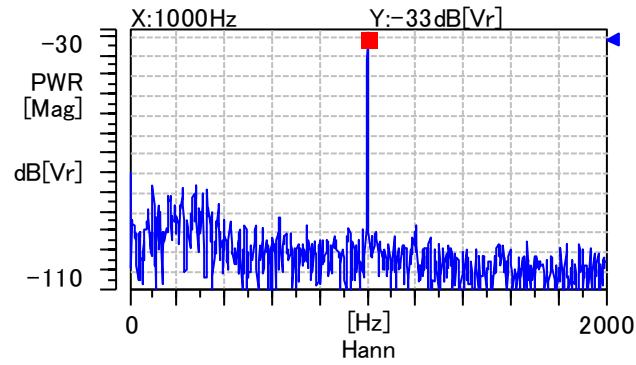


(2) ハニングウィンドウの場合

図 2-4-13 窓関数によるパワースペクトラムの比較

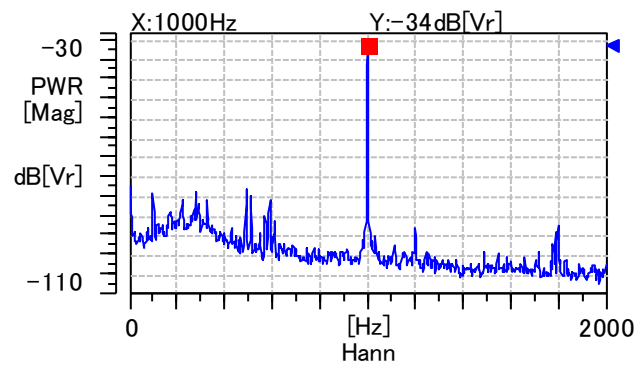
図 2-4-14 に、平均化によるパワースペクトラムの例を示す。

CH. 1 FFT HAN(FFT)



(1) 瞬時値

CH. 1 FFT HAN(FFT)



(2) 平均化 (パワースペクトルの加算平均 : 100 回)

図 2-4-14 平均化の例

第5節 FFT アナライザの操作手順

2-5-1 計測手順の概要

ここでは、インパルスハンマと加速度計 1 個を使用した伝達関数（周波数応答関数）の計測手順について説明する。

図 2-5-1 に、伝達関数の計測に必要な器材を示す。



FFT アナライザ : 小野測器 DS-2000 シリーズ <Graduo>

インパルスハンマ → FFTアナライザ 1 ch

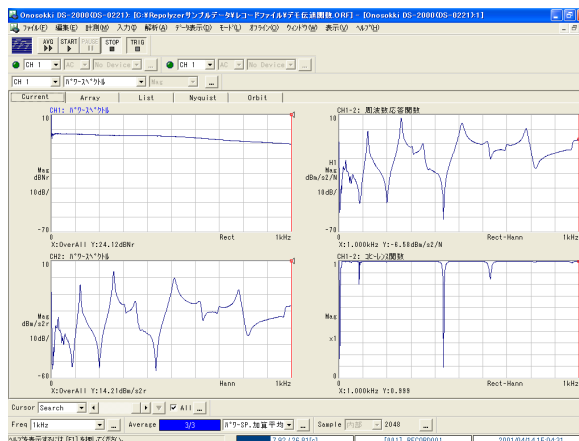
加速度計の出力 → FFTアナライザ 2 ch

FFT 解析ソフトウェア : 小野測器 DS-0221

インパルスハンマ : 小野測器 GK-3100

加速度計 : 小野測器 NP-3211

(1) 計測システム



(2) FFT 解析ソフトウェア

図 2-5-1 伝達関数の計測に必要な器材

計測準備から実際の計測まで、以下に示す順番で説明する。

①インパルスハンマと加速度計の接続

使用するインパルスハンマと加速度計を FFT アナライザに接続する。

②入力源、センサの感度、単位名の設定

インパルスハンマ、加速度計に付属しているデータシートに記載されている感度を FFT アナライザで設定する。

③電圧レンジ、周波数レンジ、トリガの設定

試しに計測しながらデータを電圧レンジ（縦軸、Y 軸）、周波数レンジ（横軸、X 軸）を調整する。

④計測及び計測データの保存

計測データを保存する。

2-5-2 機器（FFT アナライザ、センサ）の接続

加速度計とインパルスハンマを FFT アナライザに接続する。

加速度計にはアンプ内蔵型と電荷出力型の 2 種類あり、ここでは、アンプ内蔵型のセンサを使用している。アンプ内蔵型のセンサは、FFT アナライザのセンサ電流供給機能を使って、FFT アナライザに直結することが可能となる。

インパルスハンマも専用アンプを使用せずに、FFT アナライザのセンサ電流供給機能を使い、FFT アナライザに直結している。なお、アンプ側で出力を増幅したい場合には、インパルスハンマの専用アンプからの出力を FFT アナライザに入力する。

2-5-3 入力源（インパルスハンマ、加速度計）の設定

FFT アナライザに接続したインパルスハンマと加速度計の感度等を設定する。

ここでは、以下のように接続する。

FFT アナライザの 1 ch : インパルスハンマ

FFT アナライザの 2 ch : 加速度計

（1）電圧レンジの設定

FFT アナライザに入力される信号に応じた、分析可能な最大振幅（＝電圧レンジ）の設定を行う。また、必要に応じ、接続されるセンサへの電源供給、感度情報の取得、アナログフィルタの設定などを行う。

FFT アナライザの電圧設定を開き、図 2-5-2 のように設定する。電圧レンジの調整については後述する。（なお電圧レンジの変更は、メイン画面からも変更が可能である。）

[カップリング] は、両チャンネルとも [AC] を選択する。

[入力源] は、

1 ch : インパルスハンマを FFT アナライザに直結しているのので [SENSOR(2.0mV)] を選択する。

2 ch : センサ駆動電流が「2.4mV」なので [SENSOR(2.0mV)] を選択する。

[オートレンジ] は、両チャンネルとも外す。

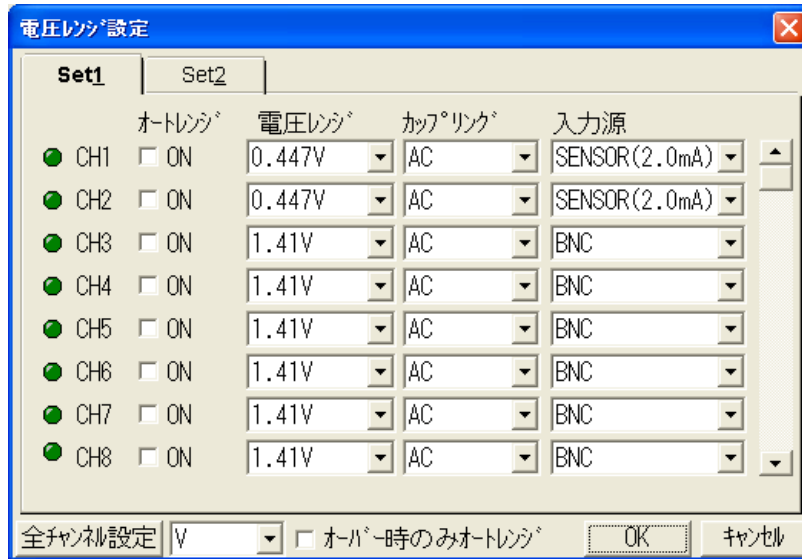


図 2-5-2 電圧レンジ設定 (DS-0221)

2-5-4 校正 (単位換算)

このままでは、振動の波形が電圧で表示されている。FFT アナライザの校正機能を使い、物理量 (力、加速度) に変換する。ここでの校正 (単位換算) とは、主にセンサの感度値校正のことである。

(1) インパルスハンマの感度

インパルスハンマに付属されてくるデータシートの中で、FFT アナライザの校正に係る情報を図 2-5-3 に示す。

HAMMER SENSITIVITY:

Hammer Configuration	Tip	PLASTIC/VINYL	PLASTIC/VINYL
	Extender	NONE	STEEL
	mV/lb	9.37	9.85
Hammer Sensitivity (S _f)	(mV/N)	2.11	2.21

図 2-5-3 インパルスハンマのデータシートの中の感度情報

同図より、エクステンダなしでプラスチック製のチップを装着した場合、1N (ニュートン) 当たり出力される電圧は、2.11 mV/N であることがわかる。

インパルスハンマによる加振力の周波数は、ハンマ先端のチップの材質によりおおまかな調整ができる。主なインパルスハンマのチップと特長を以下に列挙する。

①HARD TIP (金属製)

インパルスの立ち上がり方が急峻で高い周波数まで加振することができる。ただし、ダブルハンマリング (二度叩き) しやすくなり、パワースペクトル密度は小さくなる。

②SOFT TIP (ビニール製)

パワースペクトル密度が大きく、加振エネルギーは低周波数域に集中する。しかし、数 H_z 以下の加振を行うことは困難である。

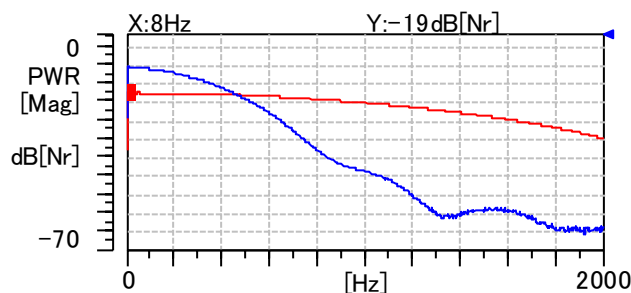
③MEDIUM TIP (プラスチック製)

金属製チップとビニール製チップの間の特性を持つ。

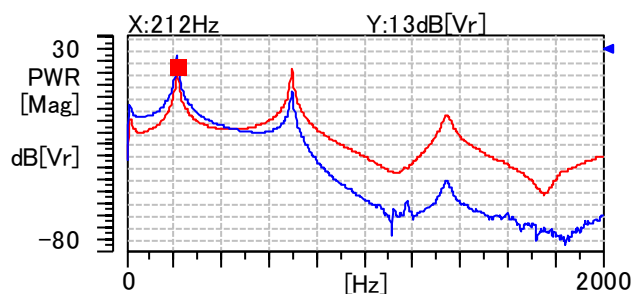
図 2-5-4 は、インパルスハンマのパワースペクトルと伝達関数の計測例で、インパルスハンマのチップを変更し比較している。同図において赤線が固いチップ、青線が柔らかいチップを示す。対象物をインパルスハンマでハンマリングし、3回のパワースペクトル平均を行った例である。

同図より、以下のことを確認できる。

- 固いチップ (赤線) では、2000Hz までゆるやかに加振力が現象する。
- 柔らかいチップ (青線) では、低い周波数での加振力 (エネルギー) は大きい、周波数が高くなると急激に加振力が減少する。



(1) インパルスハンマのパワースペクトルの比較



(2) 周波数応答関数の比較

図 2-5-4 インパルスハンマのチップによる比較

(赤線：固いチップ 青線：柔らかいチップ)

(2) 加速度計の感度

FFT アナライザの校正機能で使う感度や動作条件は、加速度計に付属されてくるデータシート（「出荷試験成績表」など）に記載されている。図 2-5-5 に、アンプ内蔵型加速度検出器の出荷成績試験表の一例を示す。

同図より、型番：NP-3110 の電圧感度は $0.482 \text{ mV}/(m/s^2)$ であり、 $1 \text{ m}/s^2$ の加速度を与えた場合に、 0.482 mV の電圧が出ることを意味している。

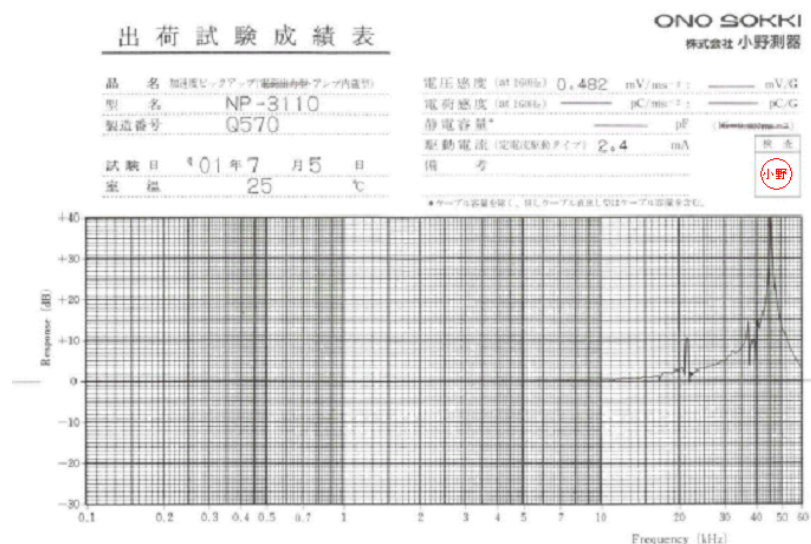


図 2-5-5 加速度計のデータシートの例

(3) FFT アナライザでの設定

FFT アナライザの単位、校正設定画面を使って説明する。図 2-5-6 では、以下のように設定されている。電圧値を各センサの基準値に校正することにより、物理量で読み取ることができる。

- 1 ch : インパルスハンマ 加振力の単位 N (ニュートン)
- 2 ch : 加速度計 加速度の単位 m/s^2



図 2-5-6 単位、校正設定画面

なお、最近の FFT アナライザでは、センサのデータベース（登録リスト）から使用するセンサを選ぶだけで上記の設定を行うものや TEDS（Transducer Electronic Data Sheet）センサと呼ばれる、校正値情報を内蔵したセンサを使って、ワンタッチで校正ができるものもある。

2-5-5 表示画面の設定

FFT アナライザの表示画面を設定する。図 2-5-7 は、表示の一例で計測に必要な波形（関数）を選んで表示することができ、1チャンネルと2チャンネルのパワースペクトル、周波数応答関数、コヒーレンス関数を表示している。

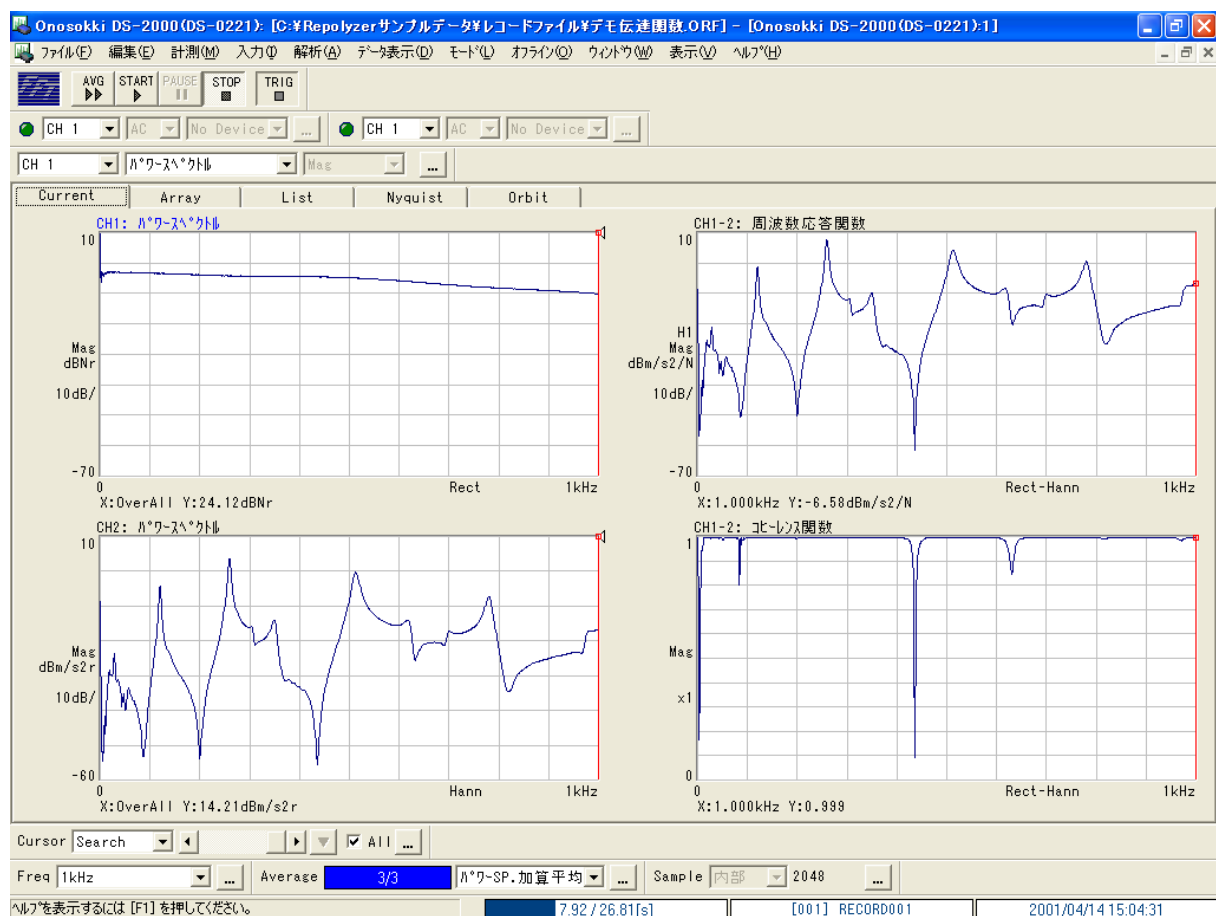


図 2-5-7 表示画面例

2-5-6 電圧レンジの設定（調整）

電圧レンジを設定する。電圧レンジは、設定画面を開かなくても、メインの画面からも変更することが可能である。

インパルスハンマによる加振は、対象物を叩くのではなく、「インパルスハンマの自重で落とし、ダブルハンマをしないように、加振後素早くハンマを引き上げる」よう

に、一定の力で対象物を加振する。両チャンネルの LEVEL インジケータの LED が赤く（レンジオーバーしない）ならないように、信号波形をなるべく大きくなる様に設定する必要がある。

*最近の FFT アナライザは、24bitA/D 変換の機器が多いので、レンジレスとまではいかなくても、16bitA/D の FFT アナライザほどは、細かく電圧レンジの調整をしなくても、十分な分解能を得られるようになってきている。

2-5-7 トリガ条件の設定

これまでの設定で、両チャンネルの信号が、レンジオーバーすることなく表示されるようになった。波形の観測をしやすくするため、FFT アナライザのトリガ機能を使い、インパルス加振した波形を停止させることができる。

FFT アナライザのトリガ設定を開き、ハンマリングしながら、図 2-5-8 のように設定する。



図 2-5-8 トリガ設定例

[トリガモード] リピート (トリガを繰り返しかけられる。)

[入力源] 内部トリガを選択します。(ハンマ入力信号 (1 ch) でトリガをかける。)

[レベル] トリガのかかる電圧レベルを設定する。(V 又は%)

[ポジション] トリガがかかった点 (トリガ点) に対して何点前から、または後からサンプリングを開始するかを指定する。トリガ点より前からサンプリングを開始することをプレトリガ、トリガ点より後からサンプリングを開始することをポストトリガという。

[スロープ] トリガの極性のこと。信号が立ち上がって設定電圧に達したときにトリガをかけるか (+)、立ち下がって設定電圧に達したときにトリガをかけるか (-)、両方でかけるかの 3 種類ある。

なお、[検出位置] 画面の中をマウスで右クリックすることも、数値入力も可能である。波形観測の影響を少なくするためには、トリガポジションを左側に設定する。

メイン画面の TRIG ボタンを押して、トリガ待ち状態にし、対象物をハンマリングする。図 2-5-9 のように波形が停止すれば、トリガ設定完了となる。

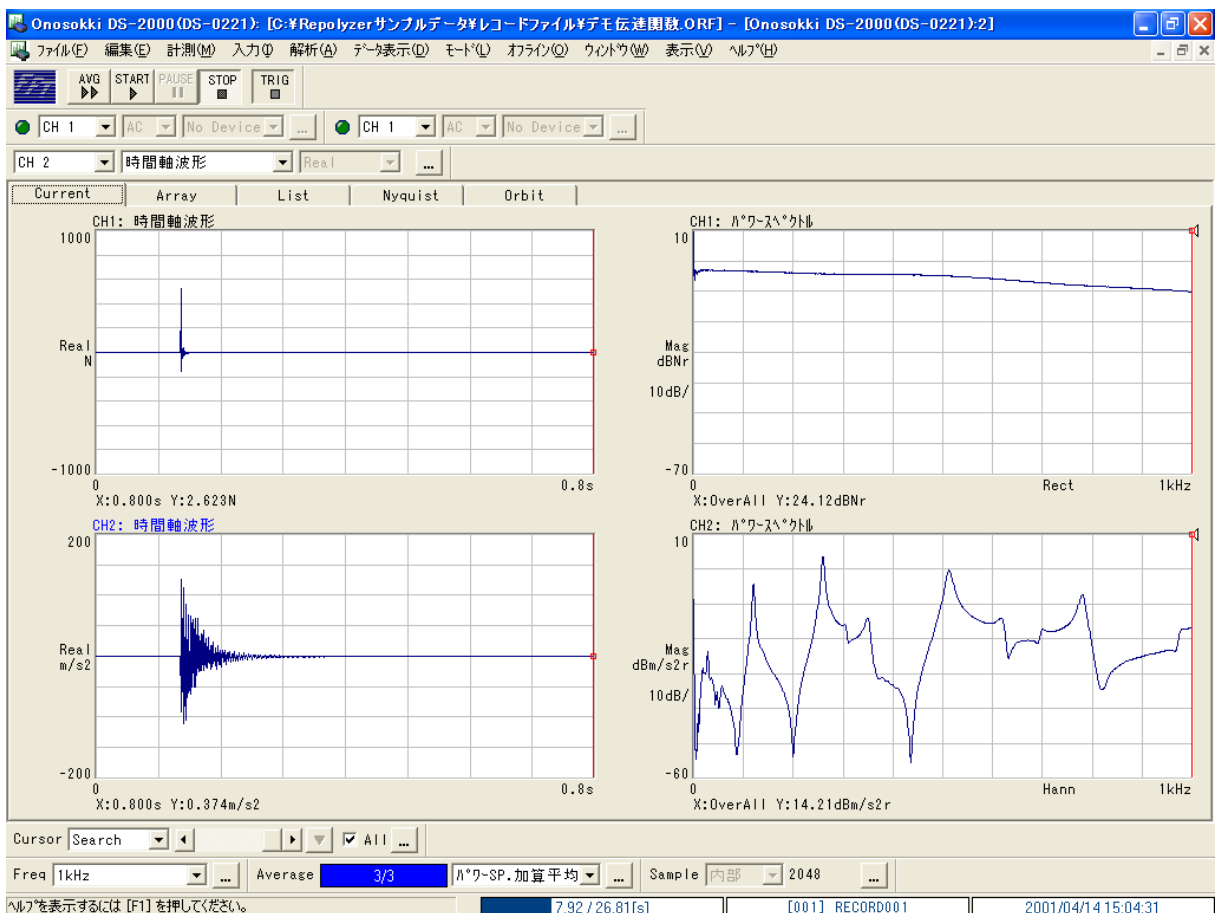


図 2-5-9 トリガ機能を使った計測例

2-5-8 窓関数（ウィンドウ）の設定

FFT 分析はもともと定常信号の解析を有限個のデータで行おうとするため、得られたスペクトルには誤差を有してしまう（リーケージ=漏れ誤差）。そこでこの誤差をできる限り小さくする手法として各種の「ウィンドウ関数」が提唱され、用途に応じて適切なウィンドウ関数を使用するようになっている。代表的なウィンドウ関数として、「ハニングウィンドウ」や「レクタングュラウィンドウ」がある。

インパルス加振による信号は、単発的な衝撃信号である。加速度形の応答波形も FFT アナライザの時間軸波形を見ると、1 フレーム内で収束しているため、両チャンネルともレクタングュラ（窓関数なし）の設定にする。

FFT アナライザのウィンドウ（窓関数）設定を開き、図 2-5-10 のように設定する。

なお、対象物の減衰が小さく 1 フレーム内で収束しない場合には、窓関数に指数ウィンドウを使うこともある。

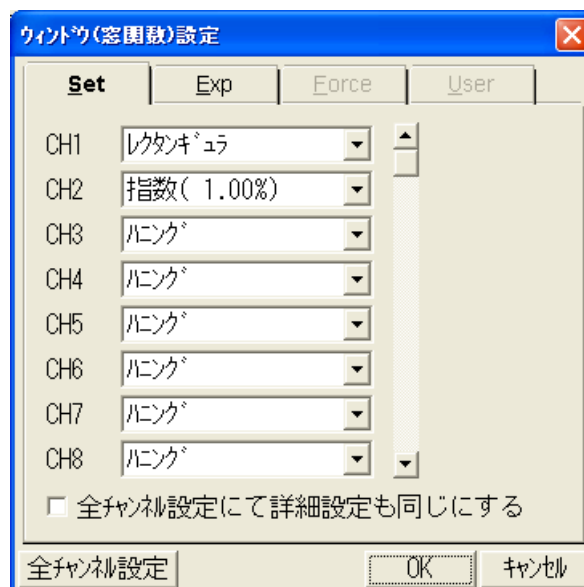


図 2-5-10 ウィンドウ（窓関数）設定例

2-5-9 周波数レンジとサンプリング点数の決定

FFT アナライザで解析できる最大周波数値（「解析周波数レンジ」）を設定する。サンプリング定理により、この数値の 2 倍以上でサンプリング（「サンプリング周波数」）する必要があるが、FFT アナライザでは、サンプリング周波数は解析周波数の 2.56 倍に設定されている。サンプリング周波数の逆数が「サンプリング時間」（=サンプリング点間の時間）となる。

FFT アナライザでは、エリアシング（折り返し現象）をおこさないようにするためアンチエリアシングフィルタが組み込まれている。

FFT 分析はデジタル演算手法であるため、ある有限個のサンプリングデータでの演算となる。この有限サンプリングデータの単位を「フレーム」、1つのフレームに含まれるサンプリングデータの個数を「サンプル長」と呼ぶ。

サンプル長は伝統的に2のべき乗が用いられ、代表的な値として1024（点）や2048（点）がある。最近のFFTアナライザでは、サンプリング点数を16382点などの分析ができるものもでてきており、サンプル長はFFT分析する時間長に比例し、「周波数分解能」に反比例する。

周波数レンジを決定する要因を列挙する。

①センサ（加速度計）の解析周波数範囲内にする

②着目する周波数分解能

同一のサンプリング点数であれば、周波数レンジが低いほど周波数分解能は細くなる。

③共振周波数をいくつ（何次）までみるのか

周波数レンジが高いほど、高次モードまで多数の振動モードを見ることができる。

2-5-10 ハンマリングに関するその他の設定

その他に、ハンマリングをする際に使用するFFTアナライザの機能について紹介する。

（1）A/D オーバーキャンセル

A/D オーバーキャンセルは、加振力やピックアップからの応答信号が電圧感度に対してぎりぎりの場合などに使用する。

平均化処理をしている場合、例えば10回平均で9回目にレンジオーバー（A/D オーバー）した場合、FFTアナライザ側で自動的にキャンセル処理を行う。

（2）ダブルハンマキャンセル

ダブルハンマキャンセルは、FFTアナライザ側で二度叩きの信号を自動的にキャンセルする機能である。対象物によりハンマリングの難易度が高い場合にこの機能をONにすると、なかなか平均化処理できない（ダブルハンマでない計測データがなかなか測定できない）こともあるため、ハンマリングの練度を上げるのが効率的な方法である。

（3）ADD+1 機能

ハンマリング試験で、精度の良いデータのみ加算平均に加えたい場合は、トリガ設定ダイアログのタグADD1/DHを開き、ADD+1機能をONにする。これは1回ずつ加算

平均を実施する・しないを確かめながら加振していくことができるが、その分、計測時間はかかることになる。

2-5-11 平均化条件の設定

FFT アナライザでの平均は、フレームを単位として行われ、計測誤差を小さくするためには、計測データの平均化処理が有効である。

平均化機能は、時間領域、周波数領域、振幅領域に分類され、様々な平均化処理が可能であるが、よく使われる処理に「パワースペクトル加算平均」がある。

平均化の回数は特に決まっていないが、平均化回数で得られる伝達関数の波形を見て、平均化回数が増えても伝達関数の波形の変化が小さくなり、平均化回数を増やす時間と計測データとのトレードオフで決定することもできる。

平均化の回数は、一般的には多くても10回程度であるが、インパルス加振の難易度が高い場合や、とにかく早く振動モード形状を可視化したい場合には、2、3回の平均化でも目的を達することができる。このように、平均化の回数は、計測の目的に応じて決定することが重要となる。

以下、参考までにFFTアナライザの平均化処理機能について説明する。

(1) 時間領域における平均化処理

図2-5-11に示す時間領域における平均化処理とは、トリガ機能を利用することにより時間軸信号を同期加算する平均化処理のことである。同期加算は、時間軸信号に含まれるトリガに同期した信号とランダムノイズ成分とを分離できるメリットがある。

時間領域平均化処理では位相情報も含まれるため、取り込みのタイミングにトリガ機能を利用する必要がある。トリガ機能を利用せずに時間領域の平均化を実行しても、位相がランダムになり平均化の意味をなさなくなり、時間領域の平均化には必ずトリガ機能を利用する必要がある。

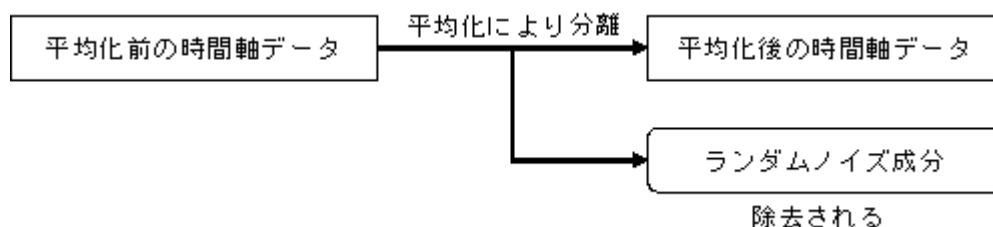


図 2-5-11 時間領域における平均化処理

①時間軸加算平均処理

時間軸信号について規格化加算平均する処理のことである。なお、平均化回数まで処理が終了すると、自動的にポーズ状態になり結果が表示される。

②時間軸指数平均

指数関数の重み付けをした平均化処理のことである。平均化回数は、最新のデータへの重み付け係数を表している。なお、時間軸指数平均は、ポーズすることにより平均化処理を止めない限り、無限に平均化処理を繰り返す。また、指数平均回数が小さいほど結果が変化し、指数平均回数が大きいほど変化は小さくなる。

(2) 周波数領域における平均化処理

図 2-5-12 に示す周波数領域における平均化処理には、パワースペクトル平均とフーリエスペクトル平均に分けられる。

パワースペクトル平均は、位相情報を含まないパワースペクトルによる平均であるので、トリガ機能の必要は無い。(チャンネル間の位相情報は保持される)これに対し、フーリエスペクトル平均は、位相情報を含むフーリエスペクトルによる平均であるため、時間軸平均化処理と同様に、トリガ機能を用いる必要がある。

周波数領域での平均化では、平均化処理後のパワースペクトル/フーリエスペクトルを用いて周波数応答関数などを演算している。

時間領域データや振幅領域データには平均化処理の結果は関係なく、それぞれ最新のデータを表示することができる。

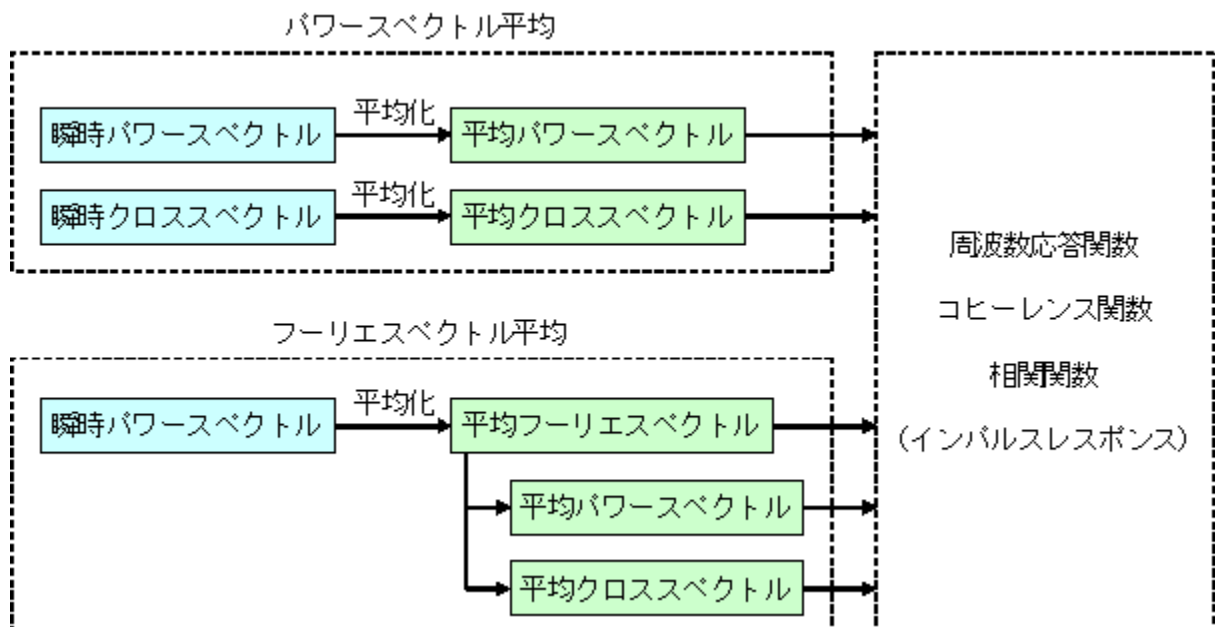


図 2-5-12 周波数領域における平均化処理

■ パワースペクトル/フーリエスペクトル加算平均

パワースペクトルおよびフーリエスペクトルの規格化加算平均する処理方法である。なお、平均化回数までの処理が終了すると、自動的にポーズ状態になり結果が表示される。

■ パワースペクトル/フーリエスペクトル指数平均

指数関数の重み付けをした平均化処理のことである。平均化回数は、最新のデータの重み付け係数を表している。なお、周波数領域の指数平均は、ポーズすることで平均化処理を止めない限り、無制限に平均化処理を繰り返す。また、平均化回数が小さいほど結果が大きく変化し、平均化回数が大きいほど変化は小さくなる。

■ パワースペクトルピーク保持

平均化スタート（開始）からポーズまでの周波数ラインごとの最大値を保持（記憶）する。したがって、平均化回数を設定する必要はないが、スタート（開始）とポーズ（終了）の操作が必要となる。平均化回数や時間が設定されていても無視される機能である。

■ パワースペクトルスweep平均

サインスweep信号（周波数掃引正弦波信号）を基準にして、その周波数でのパワースペクトルを順次加算平均することによりパワースペクトルを求める平均化方法である。

内部発振器を使う場合は、sweepの開始および終了周波数を設定することにより、FFT 処理に同期した正弦波sweepを行いながら平均化処理を行う。

また、外部発振器を使用する場合は、入力チャンネルの1つにその信号を入力し、そのチャンネルをマスタチャンネルに設定することにより、マスタチャンネルのパワースペクトルのピーク周波数を基準に、各チャンネルに対してsweep平均を行う。

■ パワースペクトル減算平均

現在の平均パワースペクトルから瞬時パワースペクトルを減算する。なお、平均化回数までの処理が終了すると、自動的にポーズ状態になり結果が表示される。

(3) 振幅領域における平均化処理（ヒストグラム加算平均）

ヒストグラム加算平均とは、振幅確率密度関数の規格化加算平均をする処理のことである。なお、平均化回数までの処理が終了すると、自動的にポーズ状態になり結果が表示される。

2-5-12 計測する

上述の設定が完了したら、ハンマリングにより伝達関数を計測する。手順を以下に示す。

- ①トリガ機能が ON になっていることを確認する。
- ②平均化 (AVG) ボタンを押すと、FFT アナライザに信号が入力されると自動的にアベレージ (平均化処理) がスタートする。
- ③ハンマリングを開始する。
- ④平均化処理は、設定した回数分のハンマリング (信号入力) が終了すると自動的に停止 (STOP) する。計測中は、インパルスハンマと加速度計の波形を見ながら、ダブルハンマ (二度叩き) がないかなどを確認しながら行う。

正しくハンマリングによる計測ができたかどうかを確認する他の方法として、コヒーレンス関数を使う方法がある。コヒーレンス関数は、入力と出力信号の相関度を表す関数のことである。FFT アナライザでは、0～1 の範囲のレベルで表示される。コヒーレンス関数はその特性上、平均化しないと計算できないため、2 回以上の計測が必要となる。入力・出力間でノイズの混入、ガタなどの非線形要素があると、コヒーレンスが悪くなり、コヒーレンスが高い (1 に近い) 場合、周波数応答関数の信頼性が高いと判断することができる。

他にも、ハンマリング試験も慣れてくると、加算平均の波形や、打音などで計測がうまくいったかどうかを判断できるようになる。

実験モード解析のように、多点の伝達関数を計測する場合には、例えば、測定点 1 番～10 番目までの計測を完了した後、再度測定点 1 番の計測を行い、最初の計測データと比較することにより、一様に加振できたかどうかを判断する場合もある。