

第2章 振動測定技術



第2章 振動測定技術

学習のねらい
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1節 FFTアナライザとは
- 第2節 ハンマリング試験
- 第3節 センサの選定
- 第4節 振動計測の手順
- 第5節 FFTアナライザの操作手順

【章全体のねらい】

FFTアナライザを使ったハンマリングの試験に必要な最低限の知識について説明する。

【章全体の解説】

FFTアナライザとはどんなものなのか、ハンマリング試験、センサの選定、FFTアナライザの操作方法の基礎的な知識及び手順を説明する。



第1節 FFTアナライザとは

学習のポイント
FFTとは何かからFFTアナライザとはどのような計測器なのか、なぜFFTアナライザが必要でどのような仕組みになっているのかについての概要を理解する

- 2-1-1 FFTとは
- 2-1-2 なぜFFTアナライザが必要か
- 2-1-3 最近のFFTアナライザについて
- 2-1-4 FFTアナライザの仕組みについて
- 2-1-5 最近のFFTアナライザ(ソフトウェア)

【節全体のポイント】

FFTとは何かからFFTアナライザとはどのような計測器なのか、なぜFFTアナライザが必要でどのような仕組みになっているのかについての概要を説明する。

【節全体の解説】

FFT-Fast Fourier Transform (高速フーリエ変換)、FFTアナライザの必要性、最近のFFTアナライザの動向、FFTアナライザの主な仕組みについて説明し、最近のFFTアナライザを紹介する。



最近のFFTアナライザ



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>)
(小野測器 XN-8000シリーズ<Repozzer>)



一体型FFTアナライザの例
(小野測器 CF-7200<チャタレット>)



FFTアナライザの仕組み

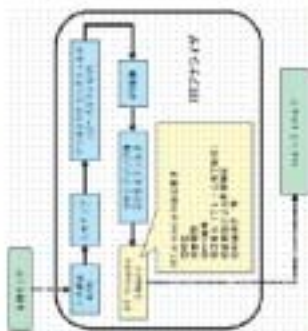


図2-1-2 FFTアナライザの内部構造の概要

【予々スリP60～P61参照】

【ポイント】

- 1) FFTアナライザPC(パソコン)の普及に伴い、PCを利用したものが主流となってきました。
- 2) FFTアナライザを使う上で重要なことは、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ます。
- 3) すぐれた性能を持つFFTアナライザですが、正確な計測のためには若干のノウハウが存在する。

【解説】

図参照

【予々スリP62参照】

【ポイント】

- 1) 一般的にFFTアナライザの仕組みを説明する。
- 2) 以後説明していくFFTアナライザの設定の位置づけ、必要性、重要性を説明する。

【解説】

図参照

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。

AD変換とサンプリング

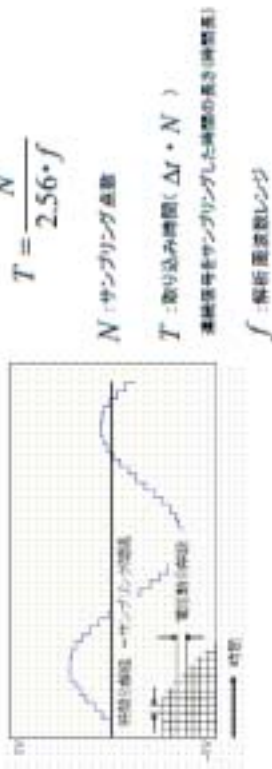


図2-1-3 サンプリングと電圧軸の分解能の関係

【ポイント】

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

【解説】
図参照

FFTアナライザのリアルタイム解析

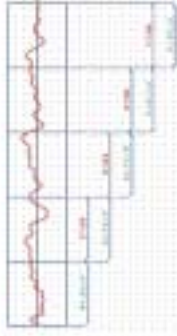


図2-1-4 リアルタイム解析

【ポイント】

リアルタイム解析とは、データに対して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。

【解説】
図参照

<補足>

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 図2-1-4のように、サンプリングにかける時間より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。



ノンリアルタイム解析とオーバーラップ処理

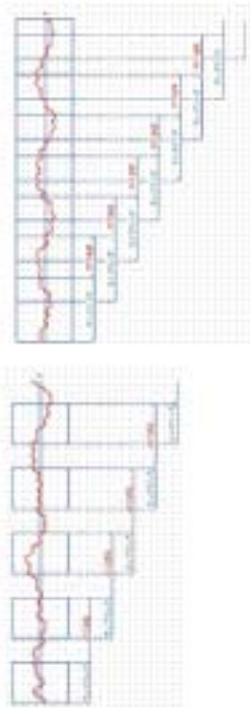


図2-1-5 ノンリアルタイム解析

図2-1-6 オーバーラップ処理

【参考】P04～P05参照

【ポイント】

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。

【解説】

図参照

1) ノンリアルタイム解析

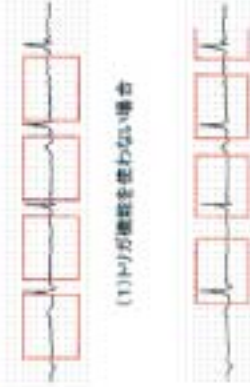
図2-1-5に示すように、FFT演算の実行に要する時間よりサンプリング時間が短いと信号の取りこぼしが発生する。

2) オーバーラップ処理

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いため、オーバーラップ処理をしている。



トリガ機能



(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

【参考】P06参照

【ポイント】

- 1) 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。
- 2) トリガ機能により、波形のうちの解析したい部分を効率よく補らえて分析できる。

【解説】

図参照

- 1) 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。
- 2) 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補らえて分析することもできる。
- 3) 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。
- 4) 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補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。



FFTアナライザのトリガの種類

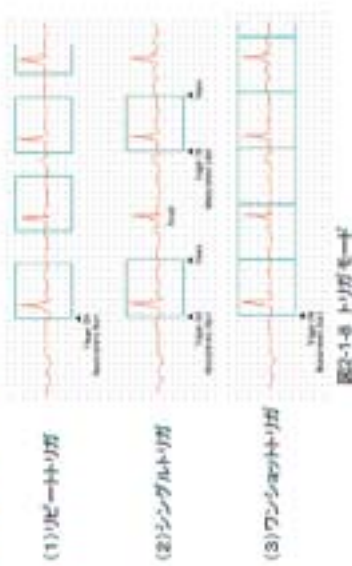


図2-1-8 トリガモード

【参考】[1-4-87-108参照](#)

【ポイント】

FFTアナライザのトリガの種類について説明する。

【解説】

図参照

1)エッジトリガ

一般的な計測に使われるトリガモードで、トリガがかかるとびびりに1フレームずつ取り込む。

2)シングルトリガ

トリガがきっかけから1フレーム取り込んだ後、トリガ待ちの状態になる。

3)ウィンドウトリガ

トリガがきっかけから1フレームを数回込んだ後、トリガをかけていないトリガフリーの状態になる。

*なお、図2-1-8は、全てフルトリガの例である。



トリガ機能のヒステリシス設定

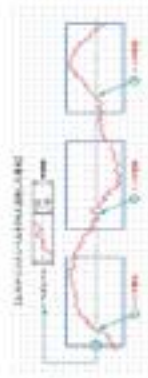


図2-1-9 トリガ値帯のヒステリシス設定

【参考】[1-4-87-108参照](#)

【ポイント】

トリガ信号のヒステリシス

【解説】

図参照

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 図2-1-9に、ヒステリシスの設定例を示す。図例では、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。



トリガ機能のスロープ設定

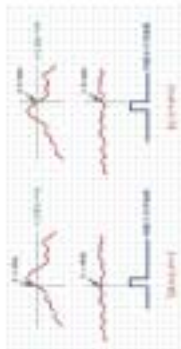


図2-1-10 FFTアナライザのスロープ設定

図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。
検知無効	0/No	信号が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。

【付キリストの参照】

【ポイント】

通常はトリガ機能のスロープは+に設定する。

【解説】

図参照



その他の機能(ハンマリング試験時)

ダブルハンマキヤンセル機能

ADD+1機能(平均化許可機能)

ダブルハンマリング(2度叩き)したデータは、高周波成分の精度に影響を与えないため、直前のハンマリングによる計測データをキヤンセルする。(平均化機能使用時)

ダブルハンマキヤンセル機能は、インパルスハンマを用いた測定時にのみ必要な機能で、インパルスハンマを使用しない測定には必要はない。(平均化機能使用時)

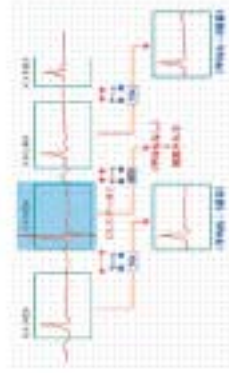


図2-1-11 ADD+1機能

【ポイント】

ハンマリング試験時のトリガに関するその他の機能

【解説】

図参照

1)ダブルハンマキヤンセル機能

2)ADD+1機能

ADD+1機能を有効にすると、インパルス加振時などトリ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ます。

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ため、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。(置き換え)



FFTアナライザを使う場合の一般的な注意点

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	留意	対策
電子回路	入力コンバータのビット数不足	振幅の増幅の不足 周波数の歪み	ビット数が多い、適切な増幅 ゲインを必要とする
入力コンバータ	電圧レンジのフルスケール（値） を適切に設定する	振幅の歪み	適切なレンジを選択する
エイリアシング (折り返し歪み)	サンプリング周波数の半分で過 渡が取り込まれる	エイリアシングによる歪み	エイリアシング防止は、アンチエイ リアシングフィルタを必要とする
リークエッジ (漏れ歪み)	時間領域での信号の不連続	エイリアシングによる歪み （サイドローブ）	適切な窓関数の設定
分解能	サンプリング点数の不足 周波数の増幅の不足	ピークの歪み ゲイン不足（減衰）の増 大	サンプリング点数の増大 適切な増幅の増大
非線形	入力増幅器、出力増幅器などの非 線形	エイリアシングによる歪み （サイドローブ）	適切な増幅の増大 （ゲインの調整）

【参考】

【ポイント】

FFTアナライザを使う場合の一般的な注意点

【解説】

図参照



第2節 ハンマリング試験

学習のポイント

ハンマリング試験の概要、利点・欠点、実際に実施する上での主な注意事項についての概要を理解する

- 2-2-1 ハンマリング試験とは
- 2-2-2 ハンマリング試験の利点・欠点
- 2-2-3 インパルスハンマリングについて
- 2-2-4 2度叩き(ダブルハンマリング)
- 2-2-5 高周波
- 2-2-6 対象物の特性による影響
- 2-2-7 計測データの確認

【節全体のポイント】

ハンマリング試験の概要、利点・欠点、実際に実施する上での主な注意事項についての概要を説明する。

【節全体の解説】

- 1)ハンマリング試験の概要及び利点・欠点について説明する。
- 2)インパルスハンマリングについて説明する。
- 3)ハンマリング試験を実施を行う際の主な注意事項について説明する。
- 4)計測データを確認するための主なポイントについて説明する。



ハンマリング試験の利点・欠点

- <利点>
- 時間がかからない
インパルスハンマとセンサー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、センサー、測定器、IT77センサーが揃えばよい。
 - 方法が簡単
加振器で必要となる加振品の固定が不要。
 - 広い測定範囲をカバー可能
インパルスハンマには加振器の固定が必要。
 - 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は計測できる。インパルスハンマでも加振できないものが計測されている。
 - 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
【参考資料P93～P94参照】
- <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微弱かつ広帯域帯域に及ぶため、加振器が振動する際のノイズが大きい。このため、簡単に減衰するが、加振器が振動する際に生じるノイズに起因して、計測結果には大きな誤差が生じる。
 - 加振力や粘りなどの非線形性を持つものには、基本的に適用できない
 - 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、測定範囲などの調整がやりにくい
基本的に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。
 - 低周波の加振が困難
低周波を加振するのは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。必要に応じてハンマを複数用意すれば、対象物の形状や構造によって行う。



インパルスハンマについて

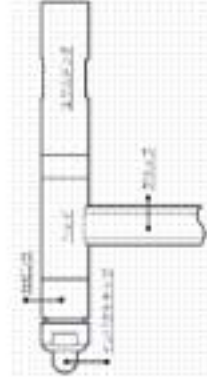


図2-2-1 インパルスハンマの構造



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)

【参考資料P94～P95参照】

【ポイント】

- 1) 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。
- 2) 理由：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ため。

【解説】

図参照

【ポイント】

- 1) インパルスハンマの構造
- 2) インパルスハンマは、対象物に応じて選定する。

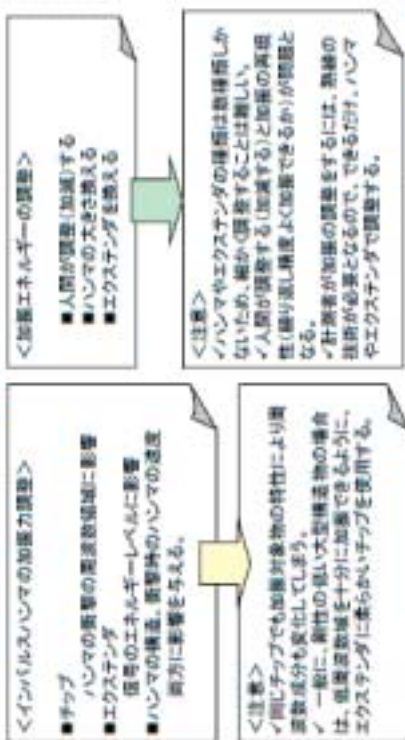
【解説】

図参照

- 1) カセンサの出力信号は、クリップエッジ部分のBNCコネクタから取り出す。
- 2) 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。
- 3) 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。



インパルスハンマの調整



【参考】P95～P96参照】

【ポイント】

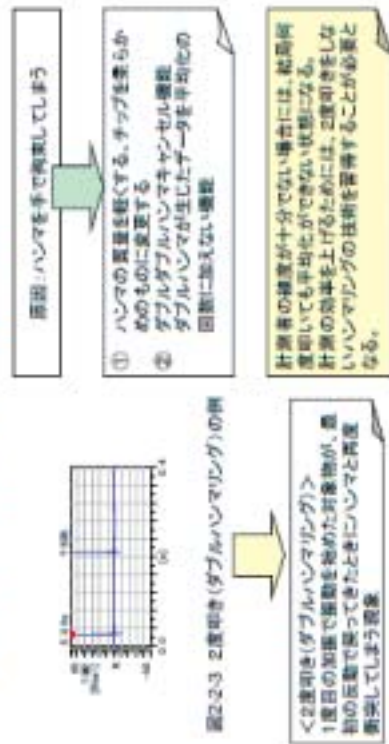
- 1)インパルスハンマの加振力調整は、エクステンダとチップを変更する。
- 2)加振エネルギーの調整は、ハンマの大きさ、エクステンダを変更する。
計測者が調整するには、経験が必要。

【解説】

図参照



2度叩き(ダブルハンマリング)



【参考】P96参照】

【ポイント】

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ングの技術を獲得することが必要となる。

【解説】

図参照

<注意>

2度叩きの波型に対し、フォーンスウィンドウ(線迹)を掛けて見かけ上2度目の加振を強く行うことでいい。
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。



FFTアナライザの窓関数(ウィンドウ)

図2-2-4 ウィンドウの説明

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、波数の一部を切取ることを、「ウィンドウ(時間窓)で波数を切り取る」とも、「ウィンドウをかける」と呼んでいる。

【ポイント】

FFTアナライザでは、連続したデータの一部(1フレーム分)を切り取ってFFT処理をしている。

【解説】

図参照

<補足>

1) 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。

2) 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数を切り取り、その区間の波数が無限に繰返されるという仮定でDFTを実行する。



正弦波のFFT処理例(整数倍)

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、

それを無視に繰り返したデータは元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離(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

【ポイント】

【ポイント】

正弦波のFFT処理例(整数倍)

【解説】

図参照



正弦波のFFT処理例(非整数倍)

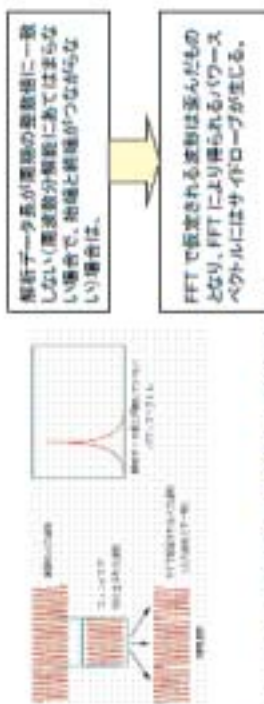


図2-26 解析データ長が周期の整数倍でない場合

【参考文献】

【ポイント】

正弦波のFFT処理例(非整数倍)

【解説】

四半期

<補足>

日本東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、これをリークage(漏れ現象)と呼ぶ。

2)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、リークage現象が生じることとなる。

3)リークage現象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けると、フレームの始端と終端がつかない(ずれ)を少なくする。

4)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。



正弦波のFFT(非整数倍)のウィンドウ処理例

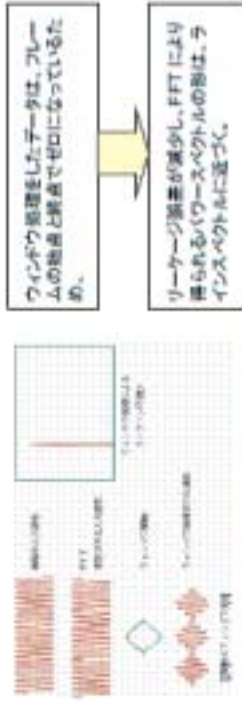


図2-27 ハニングウィンドウ処理後のスペクトル

【参考文献】

【ポイント】

正弦波のFFT(非整数倍)のウィンドウ処理例

【解説】

四半期



代表的な窓関数

表2-2-1 代表的な窓関数

種類	関数 分解式	用途
レクタングュウ	直	インパルス波形などの 過渡信号
ハロンジ	巻	一般の定数信号
アラクトトップ	巻	高周波成分などレベル を突出する信号
フォーリス	—	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、リーケージ現象
が発生する。

周波数レンジ全体のパワーの総和をオー
バオールといひ、一般的にFFTアナライ
ザでは、オーバーオールの値は窓関数の種
別がなされている。

インパルス試験は手軽に行える手段。
誤差が問題となる。この対策としてフォー
スウィングウ(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。

【参考】P100参照】

【ポイント】

代表的な窓関数

【解説】

図参照



代表的な窓関数:レクタングュウウィンドウ

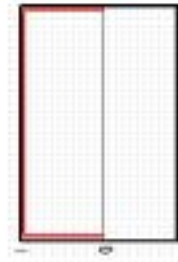


図2-2-2 レクタングュウウィンドウ

- ① 直みづけのない矩形形状のウィンドウ
- ② 方形窓または矩形窓とも呼ぶ。
- ③ レクタングュウウィンドウは、直みづけ
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りらとなるような窓
号の事例には、高い精度でスペクトルな
どを求めることができる。
- ④ 低速減衰号などでは直み(リーケージ誤
差)を免れる。

【参考】P100参照】

【ポイント】

代表的な窓関数:レクタングュウウィンドウ

【解説】

図参照



代表的な窓関数：ハニング窓関数



図2-2-8 ハニング窓関数

- ① 連続波を分析する際に、窓関数として用いられる代表的な窓関数
- ② サイドローブの影響が小さく、リークエッジ誤差の少ないスペクトルを求めることができる。
- ③ 特に高周波成分の検出に有効である。

【参考】P100参照

【ポイント】

代表的な窓関数：ハニング窓関数

【解説】

四参照

< 注意 >

ハニング窓関数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。



代表的な窓関数：フラットトップ窓関数



図2-2-10 フラットトップ窓関数

- ① ハニング窓関数に比べ高周波分解能は落ちるものの、歪み特性が良い。

【参考】P101参照

【ポイント】

代表的な窓関数：フラットトップ窓関数

【解説】

四参照

< 注意 >

フラットトップ窓関数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。



代表的な窓関数：フオースウインドウ

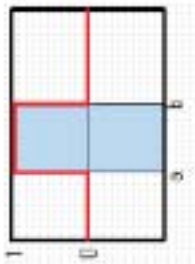


図2-2-11 フォースウインドウ

①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、「インパルス成分解析時、インパルス成分以外の成分を削除するとき」などに有効
②フオースウインドウはウインドウ内の全ての成分 (a から b) は元の値のままとし、それ以外のデータは0となる。

【参考】P4101(参照)

【ポイント】

代表的な窓関数：フオースウインドウ

【解説】

四参照

< 注意 >

フオースウインドウは、区間外を0と認識するので、処理後の信号のノイズは元の信号よりも小さくなる。なお、小さくなったノイズの補正はされない。



代表的な窓関数：指数ウインドウ

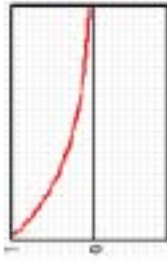


図2-2-12 指数ウインドウ

①一定の比率(減衰比)で減衰していく関数を用いたウインドウ関数
②一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、連続成分の場合と誤様に歪み(リレーキング誤差)を生じる。
③信号に指数ウインドウをかけ、強制的に1フレーム内で信号が0になるように歪みを修正することができる。
④非線形特性(スベクトルビーク)に歪みが生じるため注意が必要。

【参考】P404~P405(参照)

【ポイント】

代表的な窓関数：指数ウインドウ

【解説】

四参照



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。
理由: ガタなどの非線形性を含む対象物を加振した場合は、同一な加振や再現性のある計測が困難なため、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、励振がすぐに消えてしまい選定周波数分解能が低下する。
加振エネルギーが知照点周波数で吸収され、対象物全体を共振させるのが難しくなる。
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、このような場合は、FFTアナライザのズーム機能を併用する。

【参考】P102～P103参照

【ポイント】
対象物の特性による影響

【解説】
四参照
<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ラインで解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。



計測データの確認

ハンマリング試験は簡単に導入できるので、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。
結果の有効性や計測精度を検証するための指標について列挙する。

【参考】P102～P103参照

【ポイント】
計測データの確認

【解説】
四参照



計測データの確認：コヒーレンス関数

コヒーレンス関数(関連度関数)： 高の入力と出力の因果関係の度を示す。

<コヒーレンス関数が低下する理由>

- 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
- 応答の遅れ問題
- がなどの非線形性の存在

ノイズ信号のノイズ対策には、打撃の再現性を向上させて、平均化関数を使うことで対応する。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。これは単に応答が小さく信号がノイズで埋もれているためである。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ときには使用しないほうが良い。

【参考】P102参照

【ポイント】

計測データの確認：コヒーレンス関数

【解説】

四参照

<補足> コヒーレンス関数

1)0から1の間の値をとる。

2)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。

3)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、系の非線形性または系の時間遅延などがあると考えられる。



計測データの確認：再現性、可逆性

<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。

<可逆性>

同じ点間について、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)が一致しているが確認する。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。

【参考】P103参照

【ポイント】

計測データの確認：再現性、可逆性

【解説】

四参照



計測データの確認：線形性、他の方法との比較

<線形性>

加振力の大きさを何通りか変えて測定値の差（伝達関数）を計測する。測定値の差が異なる場合、対象物には線形に依存する性質があると考えられる。

<他の方法との比較>

「結果がおかしい」、「ハンマリング試験が通っていない」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。

【参考】P103参照

【ポイント】

計測データの確認：線形性、他の方法との比較

【解説】
図参照



第3節 センサの選定

学習のポイント

振動とは何かについて理解し、振動を検出するセンサの選択方法、計測する際のセンサの固定方法についての概要を理解する

- 2-3-1 振動とは
- 2-3-2 センサ 選択に当たっての考慮事項
- 2-3-3 センサの固定方法による測定特性の変化

【筋全体のポイント】

振動とは何かについて理解し、振動を検出するセンサの選択方法、計測する際のセンサの固定方法についての概要を説明する。

【筋全体の解説】

- 1) 振動とは何かについての概要を説明する。
- 2) 振動を検出するセンサの選定方法の基本的な考え方について説明する。
- 3) 計測する際のセンサの固定方法についての基本的な考え方について説明する。



振動と物理量

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。

- 単純振動
- 曲げ振動
- ねじり振動



図2-3-1 変位、速度、加速度の関係

【中々3とP104参照】

【ポイント】

- 1) 振動の種類
- 2) 振動を定量的に描く物理量
- 3) 微分・積分による物理量の相互変換

【解説】

図参照



振動と人間の感覚

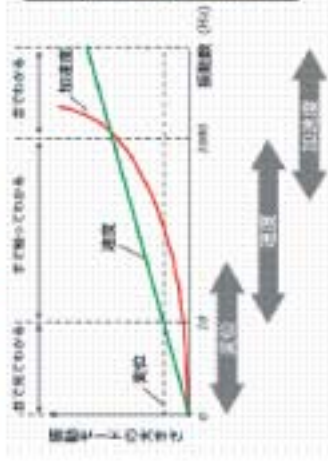


図2-3-2 振動と人間の感覚

【中々3とP105参照】

【ポイント】

一般的には、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、感度よく測れる。

【解説】

- 1) 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のように表示される。
- 2) 同図から、「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、また高速度へと移って行く。ことを読み取ることができる。」
- 3) 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。



センサ選定に当たっての考慮事項

- ①対象とする物理量は何か
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。接触式センサを適用する場合には、質量効果について、また、接触/非接触に関わらず、センサの測定必要面積と対象とする測定物の面積について考慮する必要がある。(S>1でないとき正確な計測は不可能である。)
- ③対象物の振動の大きさ、測定範囲
測定対象の振動の大きさ、測定範囲のおおよその目安を求めておく必要がある。ここでの目安を図ると、場合によっては、センサを交換する可能性がある。
- ④測定環境
測定対象並びに測定環境の温度、湿度や、油、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動に強い・弱い等、優劣・不向きがある。

【参考】P106参照

【ポイント】
センサ選定に当たっての考慮事項

【解説】
図参照



振動を検出するセンサの種類と測定対象

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	-振動一般 -振源波数帯域 -回転機械の軸受	接触	圧電式ピックアップ
速度	-小型振動体 (圧電素子、光学ピックアップ、磁気ディスク) -回転機械振動	非接触	レーザーピックアップ振動計
変位	-振源波数帯域 -回転軸(面)の傷れ	非接触	静電容量式変位計 誘電体式変位計 レーザー式変位計

【参考】P106参照

【ポイント】
振動を検出するセンサの種類と測定対象

【解説】
図参照



接触式と非接触式センサの比較

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 静容量式・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	<ul style="list-style-type: none"> 比較的高速に計測が可能 取り付け・取扱いが簡単 	<ul style="list-style-type: none"> 振動体に影響を及ぼさない 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	接触式は測定を行うために動作させ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。	センサに対し測定台を揺らぐなどして、振動を抑制する必要がある。

【参考】
【中キス社P107参照】

【ポイント】

接触式と非接触式センサの比較

【解説】

図参照



センサの固定方法と周波数特性

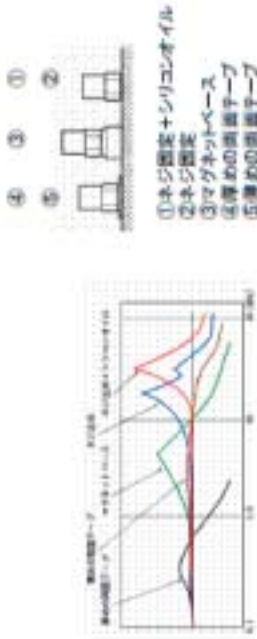


図2-3-3 センサの取付け方法と周波数特性

【参考】
【中キス社P107参照】

【ポイント】

センサの固定方法と周波数特性

【解説】

図参照



第4節 振動計測の手順

学習のポイント
計測方法の選定、伝達関数(周波数応答関数)を求め、実測データ、センサの選定及び設置、実際の計測における考慮事項などの概要を理解する。

- 2-4-1 計測の目的
- 2-4-2 計測手法の選定
- 2-4-3 伝達関数(周波数応答関数)の測定に必要なデータ
- 2-4-4 センサの選定及び設置
- 2-4-5 実験モード解析のための加振方法の選定
- 2-4-6 対象物の支持方法
- 2-4-7 FFTアナライザの設定
- 2-4-8 測定点の選定
- 2-4-9 データの確認(プレ計測)
- 2-4-10 計測・解析



振動計測の手順

2-4-1 計測の目的	2-4-6 対象物の固定(支持方法)
2-4-2 計測手法の選定	2-4-7 FFTアナライザの設定
2-4-3 伝達関数の測定に必要なデータの検証	2-4-8 測定点の選定
2-4-4 センサの選定及び設置	2-4-9 データ確認(プレ計測)
2-4-5 加振方法の選定	2-4-10 計測

【参考】

【ポイント】
振動計測の手順

【解説】
四歩型

振動計測の手順は、ユーザーにより様々なので、1例として説明する。

【箇全体のポイント】
計測方法の選定、伝達関数(周波数応答関数)を求め、実測データ、センサの選定及び設置、実際の計測における考慮事項などの概要を説明する。

【箇全体の解説】

- 1) 計測の目的と目的に応じた計測手法の選定の必要性について説明する。
- 2) 伝達関数(周波数応答関数)の測定に必要なデータについて説明する。
- 3) センサの選定及び設置、実験モード解析のための加振方法、対象物の支持方法について説明する。
- 4) FFTアナライザの設定について説明する。
- 5) 測定点の選定について説明する。
- 6) データの確認及び実際の計測・解析について説明する。



計測の目的

計測の目的に応じた計測データが必要

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



計測の目的が変わっていれば、計測は単純かと言えば、そうでもない。

例えば、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同一のため
 のモード解析か、ということに影響を受ける。
 また、いわずに解析周波数レンジを広く設定すると、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。

【参考】P108～P110参照

【ポイント】

計測の目的

【解説】

図参照

計測の目的によって、センサ、計測器、計測データは様々である。



計測手法の選定

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)



FFTアナライザの振動器: DS200C01-1000max
 入力チャンネル数: 16チャンネル
 出力チャンネル数: 16チャンネル

FFT解析ソフトウェア: 4700
 振動器: DS-025

図2-4-2 計測に必要な機材

【参考】P111参照

【ポイント】

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)

【解説】

- 1) 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。
- 2) 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。



伝達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(潮流伝達関数)が必要

正しく計測できたかどうかを確認するために、以下の計測データ(原始)をFFTアナライザでモニタ(監視)する。

- ① 時間軸波形(1ch, 2ch)
- ② パワースペクトラム(1ch, 2ch)
- ③ 潮流伝達関数(Magと位相)
- ④ コヒーレンス関数

【参考】P112～P114参照

【ポイント】

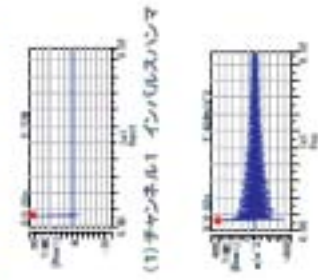
最終的に必要なデータが伝達関数であっても、正しく計測できているかを確認するために他のデータ(表示関数)を見る必要がある。

【解説】

図参照



時間軸波形(1ch, 2ch)



(2)チャンネル2 加速度計

図2-4-3 時間軸波形の例

<確認すること>
センサ(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。

<インパルスハンマの時間軸波形で確認すること>
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の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。(再現性)。
ダブルハンマをしているか。

<加速度計の時間軸波形で確認すること>
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。
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、後に述べる周波数帯域の変更も必要になる。

【参考】P112参照

【ポイント】

時間軸波形(1ch, 2ch)

【解説】

図参照



パワースペクトラム(1ch, 2ch)

(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

<確認すること>
インパルスハンマのパワースペクトラムは、測定した周波数レンジの中で何れくらいまで加算できているか。(解析に必要な周波数までフラットに加算できていることが望ましい。)
計測回数によらず均一に加算できているか。
必要に応じて、インパルスハンマの調整をする。

<実験モード解析のための注意>
応答点(加速度計)との関係では、加算点とセンサ取り付け位置が異なる位置状態にある場合においても、十分な加算力が得られている(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。

図2-4-4 パワースペクトラム

【ポイント】

パワースペクトラム(1ch, 2ch)

【解説】
図参照

1)フラットな加算

一般に、高い周波数になるほど加算エネルギーが不足する。

2)インパルスハンマの調整

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。

3)実験モード解析のためのその他の注意

応答点を何箇所か選んで、一定の加算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。

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。

<補足> 振幅依存性

対象物によっては、振幅依存性と呼ばれる、加算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算することにより、振幅依存性の影響を小さくすることができる。



周波数応答関数(ゲインと位相)

(1)位相特性

(2)ゲイン特性

<周波数応答関数>
応答点(加速度計)/入力点(インパルスハンマ)のデータ
伝達関数とも呼ばれる。

<確認すること>
平均化処理をすることで、平均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できる。
例えば、加算に失敗すると、ゲイン特性が急に低くなる。

図2-4-5 周波数応答関数(伝達関数)

【ポイント】

周波数応答関数(ゲインと位相)

【解説】
図参照

<補足> ポード零点

ちなみにポード零点とは、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。



コヒーレンス関数

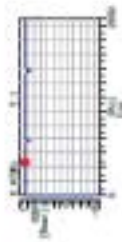


図2-4-6 コヒーレンス関数

<確認すること>
平均化した場合、1項目と2項目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ます。

<注意点>
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。

【参考】P115参照

【ポイント】

コヒーレンス関数

【解説】

図参照



センサの選定及び設置

<加速度ピックアップの選定と固定法 >

- 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りなどにも注意する
 - センサケーブルが対象物に接触して、共振が変化する。
 - 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。

【参考】P115参照

【ポイント】

センサの選定及び設置

【解説】

図参照



センサ固定方法の長所・短所

表2-4-1 センサ固定方法の長所・短所

長所	短所
ワックス	接着性が強い、面に強い 薬品の固定数まで検出不可
マグネット	接着性が強まる 固定対象が固定される
固定接着剤	固定が簡単 多様な材質へ接着可能 固定材料を戻しやすい
ネジ	固定対象にボックアップ固定用のネジ穴を開ける 必要がある

【中々スル0116参照】

【ポイント】

センサ固定方法の長所・短所

【解説】 図参照



加振方法の選定：インパルスハンマ使用

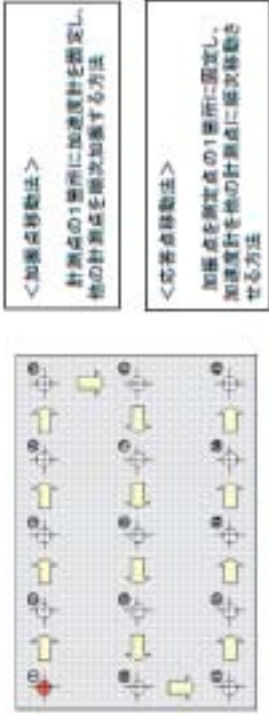


図2-4-7 加振点移動法と応答点移動法の説明

【中々スル0116参照】

【ポイント】

加振方法の選定：インパルスハンマ使用

【解説】

1) 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・・・⑤まで順次ハンマリングを行う。

2) 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に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・・・⑤まで順次移動し、ハンマリングを行う。



インパルスハンマの選定・調整(サイズ、チップ)

<p>実験モード選択における加振力の測定数値領域の調整手順</p> <p>①ハンマで試験対象を叩き、FFTアナライザで非同期化処理を行う。 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。</p> <p>②測定結果を基に、以下のチェックを行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> -電圧が適切であったか(S/N比が十分か) -測定対象(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 -測定対象の応答は、とまどきエクステンダやチップの接続部をチエックする。接続部が緩むと、値が不安定化やノイズの増加などが起こる。 <p>③加振数値領域を確認する。</p> <p>インパルス波形の測定数値形(パワースペクトラム)を見て、対象物の共振周波数をおかしているか。</p> <p>④必要に応じてチップやエクステンダを変更する。</p> <ul style="list-style-type: none"> -より高い測定数の応答が必要な場合、より硬いチップを使用。エクステンダは使わない。 -測定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。エクステンダを使う。 -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。

【9キーストック参照】

【ポイント】

インパルスハンマの選定・調整(サイズ、チップ)

【解説】

図参照

<補足>

1)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。

2)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。

3)また、一般に周波数範囲は、衝撃キヤ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。



インパルスハンマの使い方(注意点)

<p><加振時></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ハンマはゆるやかに叩く。 ■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、できるだけ一回に一回に、力の瞬間はハンマ側で行う ■手はハンマに加振を伝えるだけとする ■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 <p><加振点及び方向></p> <ul style="list-style-type: none"> ■チップの先端は、強度があるので、チップ中心が加振点になるようにすること ■加振点の位置は、事前にあらかじめ決めておくこと(加振点のマーキング) ■加振方向は、ハンマのセンター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度は以上傾かないこと ■特にエクステンダ装着時、手をまわした状態で加振すると傾きやすいようにすること <p><加振の回数></p> <ul style="list-style-type: none"> ■加振の回数、ハンマが正しい状態にあること、手で加振しないこと ■インパルスハンマが対象物を叩くのは1回に1回に叩くこと ■当てを繰り返す回数に制限を設けること <p><加振エネルギー></p> <ul style="list-style-type: none"> ■加振エネルギーを叩き方で調整する場合 ■人が力の大きさを覚える、加振者でも測定値を採るのが難しいので僅か加振ること ■第二測定値を覚えるだけで、叩くその力を覚えないこと
--

【9キーストック参照】

【ポイント】

- 1)手で加減しないこと
- 2)一定の加振を続けること

【解説】

図参照

- 1)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。
- 2)つまり、加振系に人が含まれているため、加振器を使用する場合には比本人の質量や経験が加振の良否に大きく影響する。



対象物の支持方法

対象物の固定(支持)方法は計算結果に大きな影響を与えるので、目的に合わせてきちんと決める必要がある。

<支持状態による影響の例>

インパルスハンマを使って計測対象を加振する場合

- ① バットの先端モード解析でもグリップエンド部分を示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る。
- ② 加振ごとに支持条件が変化してしまうような場合には、計測モードの精度や解析結果にも影響を与える。

【参考】

【ポイント】

対象物の支持方法

【解説】

四参照

<補足> 計測条件以外の記録について

1) 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。

2) 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。

自由支持

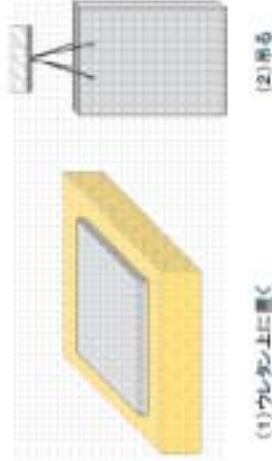


図2-4-6 自由支持の例

<注意点>

- ① 対象物を支持する物は、できるだけやわらかいものを使用。
- ② 対象物に対して付加される質量や慣性の影響をできるだけ小さくする。
- ③ 対象が固定してできるより対対象物を支持する。

<実験モード解析での注意>

- ① 対照モード(固定モード)では、振動モード形状に異なるが、実験モード解析で変動しないモード(剛体モード)がある。
- ② 市販の専用ソフトウェアなどの強制点が、固定のようの特徴を示す影響があるので、計測モード及び振動モード形状を見る際には考慮する。

【参考】

【ポイント】

自由支持

【解説】

四参照

1) 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す。

2) 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。

3) 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。



固定支持、弾性支持

<固定支持の注意点>

- ① 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。
- ② ボルト固定して固定しただけでも、振動時には剛性の不足や接触面の磨き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れば完全固定になっていないことを確認できる。
- ③ 接触面では締め付けと面角方向の剛性が低下する。
- ④ 基礎の弾性振動の影響により、主に高周波で達成振動が発生することがある。

<弾性支持>

- ① 対象物に対し、ばねなどを介して固定する方法
- ② 設置方法が難しい(構造的に難関になる)ので、積極的に弾性支持を再検討することは少ないようである。
- ③ 実験の対象物が、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、自由運動だけでなく強制運動の要素も含まれることに注意が必要となる。

【9キーストP121参照】

【ポイント】

- 1) CAEとの対応という面では、自由支持がよい。
- 2) 固定支持は、実験では再現できない。
- 3) 弾性支持は、複雑。

【解説】

1) 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密着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半ば手探めをした状態を固定支持とみなしたりする。

2) 固定支持を避ける理由

固定支持は自由支持より、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得くことは、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。



FFTアナライザの設定

<インパルスハンマと加速度計を併せて伝達関数を計測する場合>
① センサの設置 <ul style="list-style-type: none"> ■ インパルスハンマ、加速度計から振動を抽出できるようにする。 ■ 校正、感度設定、単位をを入力する。
② 電圧レンジ <ul style="list-style-type: none"> ■ 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 <ul style="list-style-type: none"> ■ 対象物の共振周波数の数から、適切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 平均処理 <ul style="list-style-type: none"> ■ 信号の種類(形状)に応じた平均関数を選択する。
⑤ 平均化処理 <ul style="list-style-type: none"> ■ 実験のばらつきの影響を抑えるため、平均化処理を行う。

【9キーストP122参照】

【ポイント】

FFTアナライザの設定

【解説】

四歩目



測定点の選定

実験モード解析においては、解析したい振動モード形を表現できるだけの測定点数が必要となる。

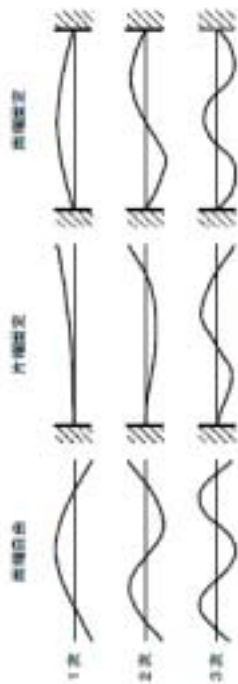


図2-4-3 各種支持方法と振動モード形

【参考】p123参照

【ポイント】

測定点の選定

【解説】

四参照



計測点数

計測点数は、最低でも振動モード形を表現できるだけの点数が必要となる。



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	2	2	3
2	4	3	4
3	6	4	5
N	$2N-2$	$2N-1$	$2N-1$

【参考】p123参照

【ポイント】

計測点数

【解説】

四参照

面の振動モード形状

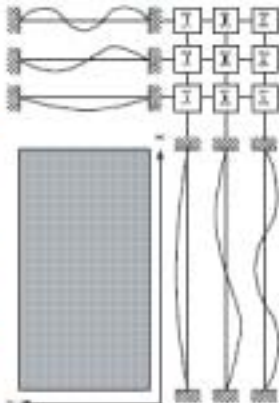


図2-4-11 平板の振動モード形と計測点の関係

<計測点の基本考え方>

- ① 測定点はいずれも既知された振動モード形状を備えていることが前提で、計測位置だけでその振動モード形状を正確に再現できるように加振する必要があります。
- ② 本振の振動モード形状の振動数は必ずしも、測定点数を求めるのが前提には必ずしも必要ではありません。測定点数を求めることが目的です。
- ③ 本振の振動モード形状が既知しない場合は、共振試験は計測する振動モード形状の固有振動数の数が多いほど良い、計測点数を増やして列挙することが必要です。また、モード形状が既知しない場合は、モード形状が既知しない振動モード形状の計測点を増やして加振する必要があります。
- ④ 同様に既知しない振動モード形状の固有振動数の場合にも、その固有振動数の後の共振試験を繰り返すことで、その計測の固有振動数が低い方から計測することで、測定点をどの程度加振すべきかを決められるようになります。

【参考】p124参照

【ポイント】

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。

【解説】

図参照

- 1) 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て見ている。
- 2) 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。

<注意> 振動モードの節

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振幅数(固有振動数)は計測できない。



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體だけでもつかむことが重要
例えば、梁のモードを既知しない場合は、あらかじめ振動モード形状の傾向をつかんだ後、特に既知した部分の測定点を増やすことにより、全体のモード形状と類似した部分の振動状態を把握しやれい。

データの確認(伝達関数の計測)

- インパルスハンマの時間軸調整
- 加速度計の時間軸調整
- インパルスハンマのバースベクトラム
- ピークレベル
- 打音や加振機の共振
- など

効果の高い計測のためには、計測の精度向上が重要

一定の加振ができただけかどうかの確認

- 全ての測定点の計測が終わった後、高層1面層の測定点の伝達関数を計測し、これを1面層の計測データ(もしくは既に計測した複数の測定点のデータ)と比較する。最後の測定点と同じように加振できていることが重要
- 測定点が高層になるような場合、同一形状の部品を繰り返し計測する場合は、加振機の利得やセンサを自動的に調整させるソフトウェア調整の準備が有効

【参考】p125参照

【ポイント】

- 1) 計測の精度向上(つまりインパルスハンマで加振できる)により、効率よく計測を進めることができるようになる
- 2) プレ計測を利用することで、本計測とそれ後の解析の手戻りを減らせる。

【解説】

図参照



計測・解析：平均化の注意

<平均化の問題>

■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、通常の計測環境などでは、もう少し多くする。

<続けて加振する場合>

■続けて加振する場合には、応答が半減しないように、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。

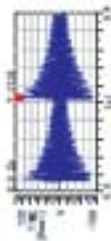
【ポイント】
計測・解析：平均化の注意
【解説】
四参照



計測・解析：ダブルハンマリング



(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

<特に対象物の減衰が小さい場合>

振動が収束するまでに時間がかるため、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。

【ポイント】
計測・解析：ダブルハンマリング
【解説】
四参照



計測・解析：窓関数

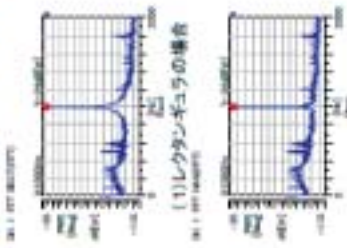


図2-4-13 窓関数によるパワースペクトラムの比較

【ポイント】
計測・解析：窓関数

【解説】
図参照

【参考】P127参照



計測・解析：平均化

パワースペクトラムの平均化による比較例

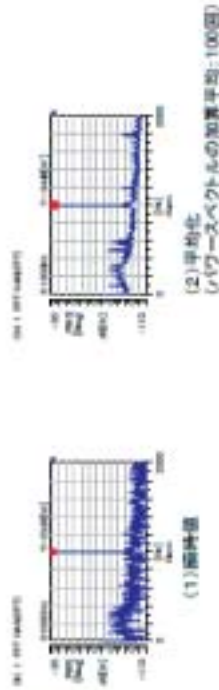


図2-4-14 平均化の例

【参考】P128参照

【ポイント】
計測・解析：平均化

【解説】
図参照

第5節 FFTアナライザの操作手順

学習のポイント
ハンマリング試験による伝達関数(周波数応答関数)を計測する際のFFTアナライザの操作手順の概要を理解する

- 2-5-1 計測手順の概要
- 2-5-2 機器(FFTアナライザ、センサ)の接続
- 2-5-3 入力源(インパルスハンマ、加速度計)の設定
- 2-5-4 校正(単位換算)
- 2-5-5 表示画面の設定
- 2-5-6 電圧レンジの設定(調整)
- 2-5-7 トリガ条件の設定
- 2-5-8 窓関数(ウィンドウ)の設定
- 2-5-9 周波数レンジとサンプリング点数の決定
- 2-5-10 ハンマリングに関するその他の設定
- 2-5-11 平均化条件の設定
- 2-5-12 計測

【節全体のポイント】
ハンマリング試験による伝達関数(周波数応答関数)を計測する際のFFTアナライザの操作手順の概要を説明する。

【節全体の解説】
ハンマリング試験による伝達関数(周波数応答関数)を計測する際のFFTアナライザの操作手順の概要について、実際の手順とおおひ(1例)に説明する。

計測手順の概要

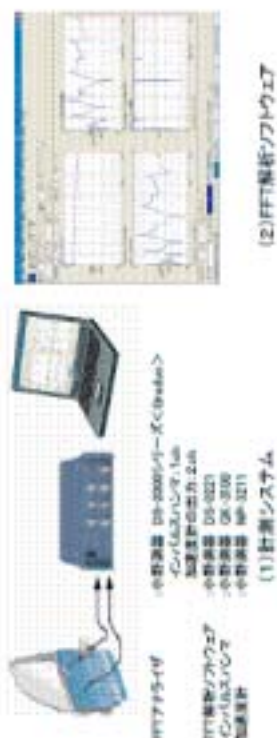


図2-5-1 伝達関数の計測に必要な器材

【テキストP128参照】

【ポイント】
計測手順の概要

【解説】
図参照



伝達関数の計測手順

- 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、単位等の設定
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設定する。
- ③計測
計測をする。
- ④計測データの保存
計測データを保存する。

【参考】P120参照】

【ポイント】
伝達関数の計測手順

【解説】
図参照



機器(FFTアナライザ、センサ)の接続

- <加速度計>
アンプ内蔵型と電圧出力型の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圧供給機能を使って、FFTアナライザ
に接続することが可能となる。
- <インパルスハンマ>
専用アンプを使用せずに、FFTアナライザのセンサ電圧供給機能を使い、FFTアナライザ
に直接している。
なお、アンプ側で出力を増強したい場合には、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。

【参考】P130参照】

【ポイント】
機器(FFTアナライザ、センサ)の接続

【解説】
図参照



入力源（インパルスハンマ、センサ）の設定

FFTアナライザの1ch:インパルスハンマ、FFTアナライザに接続
 FFTアナライザの2ch:加速度計、FFTアナライザに接続



図2-5-2 電圧レンジ設定 (DS-0221)

【参考】P130からP131参照

<電圧レンジの設定>
 必要に応じて、接続されるセンサへの電
 源供給なども設定する。

[カプリング]
 周子チャンネルとも(AC)

[入力源]
 1ch : [SENSOR(2.0mV)]
 2ch : [SENSOR(2.0mV)]

[オートレンジ]
 周子チャンネルとも外す

【ポイント】

入力源（インパルスハンマ、センサ）の設定

【解説】

図参照

<補足1> 電圧レンジ

FFTアナライザに入力される信号に応じて、分析可能な最大振幅（＝電圧レン
 ジ）の設定

<補足2> 電圧レンジの調整方法 (DS-0221)

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。

校正（単位換算）

電圧で表示されている振動の波形を、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。

Channel	Unit	Scale	Offset	Filter	Gain	Attenuation	Input
1	mV/N	1.00	0.00	1000	1.00	0.00	IMPACT
2	m/s ²	1.00	0.00	1000	1.00	0.00	ACC

図2-5-3 インパルスハンマの
 チャンネル中の感度値

エクステンダなしでブラスタック製の
 チップを装着した場合、1N（ニュー
 トン）当たりには出力される電圧は、
 211 mV/N である。

【参考】P131参照

【ポイント】

校正（単位換算）

【解説】

図参照



インパルスハンマのチップによる比較



< 柔らかいチップ (青線) >
 ■ 2000Hzまでゆるやかに加振力が減少する。

< 柔らかいチップ (青線) >
 ■ 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ワースベクトルの比較

(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
 (青線: 柔らかいチップ 青線: 柔らかいチップ)

【参考】P132参照

【ポイント】

インパルスハンマのチップによる比較

【解説】

四参照

1) < 補足 > インパルスハンマのチップの種類
 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よかな調整ができる。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、ワースベクトル歪度は小さくなる。

②SOFT TIP(ビニール製)

ワースベクトル歪度が大きく、加振エネルギーは低周波数域に集中する。しかし、数kHz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)

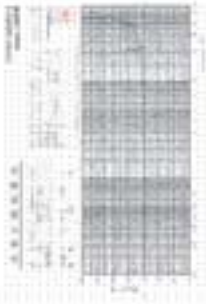
金属製チップとビニール製チップの間の特性を持つ

2)計測データの条件

- ・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回のワースベクトル平均を行った例である。



加速度計の感度



型番: NP-3110の電圧感度は、
 0.482 mV/(m/s²) であり、
 1m/s² の加速度が加えられた場合に、
 0.482 mV の電圧が出力されることを
 意味している。

図2-5-5 加速度計のデータシートの場合

【参考】P133参照

【ポイント】

加速度計の感度

【解説】

四参照

1)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。



FFTアナライザでの設定



図2-5-6 単位、校正設定画面

【ポイント】
【解説】
図参照

【ポイント】
FFTアナライザでの設定

【解説】
図参照



表示画面の設定

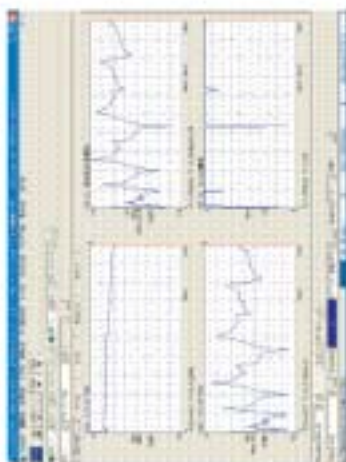


図2-5-7 表示画面例

【ポイント】
【解説】
図参照

【ポイント】
表示画面の設定

【解説】
図参照

1chセンサーと2chセンサーのボリースペクトル、周波数応答関数、コヒーレンス関数を表示



電圧レンジの設定 (調整)

■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質量で落とす、ダブルハンマをしないように、加振状態をハンマを引上げる」ように、一定の力で対象物を加振する。

■両チャンネルのレベルレンジケータが赤くレンジオーバーしないように、信号波形をなるべく大きくする様に設定する。

【参考】P134参照

【ポイント】
電圧レンジの設定 (調整)

【解説】
図参照
<補足>

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がらも、十分な分解能を得られるようになってきている。

トリガ条件の設定

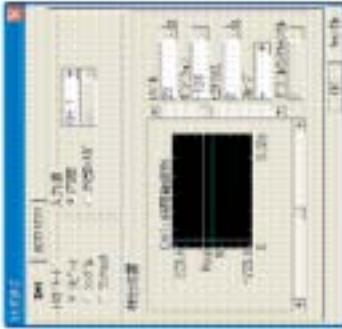


図2-5-8 トリガ設定例

【トリガモード】
リセット
(トリガを繰り返しかけられる。)
【入力源】
内部トリガを選択
(ハンマ入力信号(1ch)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
(V又は%)
【ホジション】
トリガがかかった点(トリガ点)に対して荷重前か
ら、または後からサンプリングを開始するかを指
定
【スロープ】トリガの極性

【参考】P136参照

【ポイント】
トリガ条件の設定

【解説】
図参照

1) 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。

2) 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。

2)トリガホジション

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。

3)トリガスロープ

信号が立ち上がった設定電圧に達したときにトリガをかけるか(+),立ち下がった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種類がある。

4) [検出位置]での設定

[検出位置]画面の中をマウスで右クリックすることも可能

5) <補足> トリガホジション

波形観測の影響を少なくするためには、トリガホジションを左側に設定する。



トリガ条件設定後の計測例

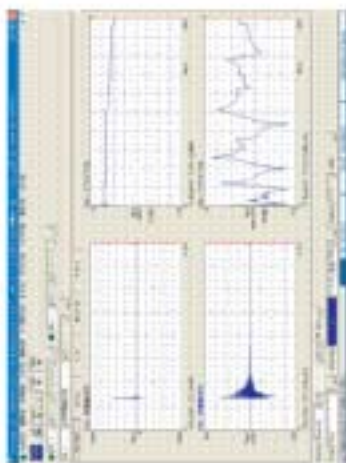


図2-5-9 トリガ機能を使った計測例

【テキストp136参照】

【ポイント】

トリガ条件設定後の計測例

【解説】

図参照



窓関数(ウィンドウ)の設定

窓関数	パラメータ	設定値
CH1	TYPE	2
CH1	SCALE	1
CH1	START	0
CH1	STOP	0
CH2	TYPE	2
CH2	SCALE	1
CH2	START	0
CH2	STOP	0

図2-5-10 ウィンドウ(窓関数)設定例

インパルス加算による信号は、単発的な衝撃信号である。加減速度形の応答波形もFFTアナライザの時間軸変形を考えると、リフレッシュ内で収束しているため、周波数軸とともクワンテラ(窓関数なし)の設定にする。なお、対象物の減衰が小さくリフレッシュ内で収束しない場合には、窓関数に帯域ウィンドウを使うこともある。

FFT分析はもとより窓関数の解析を有源関のデータで行おうとするため、開られたスケトルには誤差を有してしまふ(リークエージャー漏れ現象)。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。

【テキストp137参照】

【ポイント】

窓関数(ウィンドウ)の設定

【解説】

図参照

直前のトリガ条件設定後の計測例のスライドの画面表示例(CH1、CH2の時間軸視形)を基って説明すると分かるやうい。



周波数レンジとサンプリング点数の決定

<p><周波数レンジを決定する要因></p> <ul style="list-style-type: none"> ①センサ(加速度計)の解析周波数範囲内であること ②観測する周波数分解能 ③同一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かくなる。 ④異なる周波数レンジ(何回)までみるのか ⑤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。
<p><サンプリング点数(サンプリング長)></p> <ul style="list-style-type: none"> ①サンプリング長は伝統的に20~べき乗が用いられ、代表的な値として1024(点)や2048(点)がある。 ②サンプリング長はFFT分析する時間長に比例し、「周波数分解能」に反比例する。このため、サンプリング点数が大きくなると計測時間(1フレーム分のデータと取り込み時間)も長くなる。 <p>FFT分析はデジタル演算手法であるため、ある有限長のサンプリングデータでの演算となる。 フレームごとの有限サンプリングデータの単位 サンプル長: 1つのフレームに含まれるサンプリングデータの個数</p>

【参考】P137参照

【ポイント】

周波数レンジとサンプリング点数の決定

【解説】

四参照

1)サンプリング定理

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(1サンプリング周期)する必要がある。

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(1サンプリング点間の時間)となる。

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

2)サンプリング長

FFT分析はデジタル演算手法であるため、ある有限長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「サンプリング長」と呼ぶ。

サンプリング長は伝統的に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、サンプリング長はFFT分析する時間長に比例し、「周波数分解能」に反比例する。



ハンマリングに関するその他の設定

<p><ADコンバータキャンセル></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 加振力やピックアップからの応答信号が電圧範囲に対して足りず、ADコンバータに飽和している場合、例えば1000平均で9回目にレンジオーバー(ADオーバー)した場合は、FFTアナライザ側で自動的にキャンセル処理を行う。
<p><ダブルハンマキャンセル></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ FFTアナライザ側で二重回りの信号を自動的にキャンセルする機能 ■ 対象物によりハンマリングの発生度が高い場合、なかなか平均化処理できない(ダブルハンマでない測定ができない)こともあるため、ハンマリングの程度を上げるのが効果的な方法である。
<p><ADD+1機能></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ハンマリング試験で、精度の良いデータのみの加算平均に加えて、計測回数ずつ加算平均を演算するしないを切りながら加算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。

【参考】P138参照

【ポイント】

ハンマリングに関するその他の設定

【解説】

四参照



平均化条件の設定

<FFTアナライザでの平均>
 ■フレームを単位として演算
 ■計算時間を小さくするためのには、計測データの平均化処理が有効

<平均化機能の種類>
 ■時間領域、周波数領域、振幅領域に分極され、様々な平均化処理が可能
 ■よく使われるのは、「ワースベクトル加重平均」

<平均化回数>
 ■平均化回数は、計測の目的に応じて決定することが重要
 ■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变化が小さくなり、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。
 ■一般的には多くても10回程度であるが、インパルス加算の測定精度が高い場合や、とにかく単一脈動モード形状を見たい場合には、2、3回の平均化でも目的を達することができる。

【参考】P139参照

【ポイント】

平均化条件の設定

【解説】

図参照



FFTアナライザの平均化処理機能



図2-5-12 周波数領域における平均化処理

【参考】P141参照

【ポイント】

FFTアナライザの平均化処理機能

【解説】

図参照

1) 時間領域における平均化処理

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アンダースAMPLE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図をなさなくなり、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。

2) 周波数領域における平均化処理

ワースベクトル平均とフーリエスペクトル平均に分けられる。

ワースベクトル平均は、位相情報含まないワースベクトルによる平均であるので、トリガ機能の必要はない。(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、位相情報を含むワースベ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、平均化処理後のワースベクトル/フーリエスペクトルを用いて同期加算回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。



計測する

<ハンマリングによる伝達関数を計測手順>

- ①トリガ機能がない場合には、トリガボタンを押す。
- ②平均化(AVG)ボタンを押すと、FFTアナライザに番号が入力されると自動的にアベレーン(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、指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、インパルスレシメと加速度計の波形を要ながら、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。

<正しいハンマリングによる計測ができたか確認する方法>

- コヒーレンス関数を使う。
- 加算 平均の波形や、打音など判断
- 実験を1回解析のよりに、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、一様に加算できたかどうかを判断する場合もある。

【参考】

【ポイント】
計測する

【解説】
四参照

<補足>正しいハンマリングできたか確認する方法

- 1) コヒーレンス関数を使う方法
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、コヒーレンスが低い(1に近い)場合、周波数応答関数の信頼性が低いと判断することができる。
- 2) 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。
- 3) 実験モード解析のよりに、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、一様に加算できたかどうかを判断する場合もある。