

なるほど！シリーズ3 振動の測定と分析法

「これだけ知っていれば ほぼ 大丈夫」



振動の計測は物が破損や機能劣化を生じた場合、あるいは物の耐振動性を確かめるなどの場合に行うことはシリーズ2で理解できました。また、具体的には振動している物の①振動数、②固有振動数、③、振幅、④減衰比、⑤振動モードを計測する必要があることも理解できました。ところで振動はどのように計測し、どのような分析をするのでしょうか？



振動を計測するために必要な機器は

- ①検出器 : 振動を感じるセンサ(加速度計、変位計、歪ゲージなど)
 - ②アンプ : センサーからの信号を増幅する増幅器(センサの種類に対応した増幅器)
 - ③レコーダ : 電気信号を記録する記録器(データレコーダ、メモリレコーダなど)
 - ④分析器 : 信号を分析する機器(周波数分析器、ベクトル分析器など)
- です。

このほかに主に打撃試験では基本的に

- ⑤フォースハンマ: 打撃力を計測する力センサ付きハンマを使用します。

次ページは代表的な振動計測ブロック線図を示します。



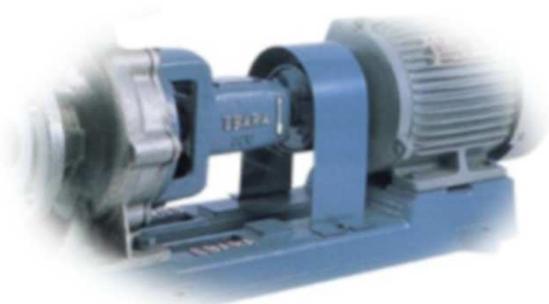
振動計測のブロック線図

測定対象物

検出器

増幅器

分析器



目的に応じた
検出器を選定

歪ゲージ



加速度計 (歪ゲージ式)



加速度計 (圧電式)



変位計 (渦電流式)



変位計 (レーザー式)



目的を達成する
ための適切な分
析法を選定



測定対象物にセンサを取り付け、増幅器などを結線すれば、問題なく計測出来るということですか？
正しく計測するためには色んなノウハウが必要だと感じています。計測上の注意点などについて説明して下さい。



正しく計測するための前段階として次のようなことを調べておく必要があります。

- ①計測量(測定物理量)の決定
 - ②計測範囲(レベル、振動数)の予測、推定
 - ③検出器の特性の把握
 - i) 測定レベル範囲、応答性(周波数特性:振幅、位相)、精度、S/N
 - ii) 耐環境性、安定性
 - ④検出器が計測結果に及ぼす影響度把握
 - i) 検出器の質量が振動特性に及ぼす影響
 - ii) 検出器の取付位置、方法が振動特性に及ぼす影響
- 夫々の事項について詳しく説明します。



①計測量(測定物理量)の決定

計測目的を果たすため、計測したい物理量(変位、速度、加速度、力、歪など)を決める必要があります(測定する物理量により、検出器の種類が異なるためです)。

例えば、強度上の問題解決のための計測であれば、歪、力、圧力、加速度などが、性能確認のための計測であれば、温度、圧力、流速などが計測項目と考えられます。

最適な物理量が諸般の事情(検出器の耐環境性や取付環境や取付スペースなど)により直接計測することが不可能な場合があります。その場合には、間接的に別の物理量を測定し、その結果から目的の物理量を求める場合もあります。

例えば、加速度の計測結果から力を求めたり、変位を求める場合がありますが、前者の場合には等価質量のとり方*¹、後者の場合は計算誤差などに注意が必要です。

また、歪ゲージを用いて荷重、変位などを測る方法*²もありますが、この場合には事前に歪量と物理量に関する校正が必要ですし、起歪部を含むセンサとしての応答特性を考慮することが必要です。

*¹:ニュートンの法則は力=質量*加速度です。加速度が質量全体に作用する場合はこの式を用いれば加速度から力は求まります。一方、構造体の衝撃事象などでは加速度は構造体の一部分に作用し、打撃点より離れた構造体の部分では打撃点と同時に質量に加速度が作用していません。そこで衝撃事象に対する等価な質量を考慮する必要があります。

*²:歪ゲージがいろいろな検出器(センサ)の検出素子に利用されますが、詳しくは本資料のおまけ⑤ 歪ゲージの使い道はいろいろの項を参照して下さい。



②計測範囲(レベル、振動数)の予測、推定

計測する物理量を決めたら、次は大まかに計測したい振動数範囲と振幅を決めます。
その理由は計測したい振動数範囲や振幅により選定する検出器の仕様が異なるためや周波数分析における周波数範囲を決めるため、また、検出信号のS/Nを良くするなどのためです。



例えば、

- i) 地震の波に含まれる主な振動数成分はDC～50Hz程度です。
この場合には歪ゲージ式の加速度計など低周波数特性の優れた検出器を選びます。
- ii) 回転数が3600rpmのポンプなどでは軸の回転に伴い軸や配管が振動する主な振動数成分は60Hz(=3600rpm/60s)とその整数倍です。
また、配管内部の液体が羽の回転に伴い振動(脈動と云う)する場合の主な振動数はポンプの回転数*羽枚数またその2倍の振動数です。
このような場合は圧電式などの高周波数特性の優れた検出器(加速度計)を選びます。

もちろん、歪ゲージ式の検出器で高周波数特性の優れたものを選定することも出来ますが、感度特性を考慮する必要があります。(一般的に高周波数特性の優れている加速度計(固有振動数の高いもの)は加速度に対する検出感度が低くなります)

計測範囲の予測、推定は検出器の選定その他、増幅器や分析器の特性を考慮するためにも必要です。

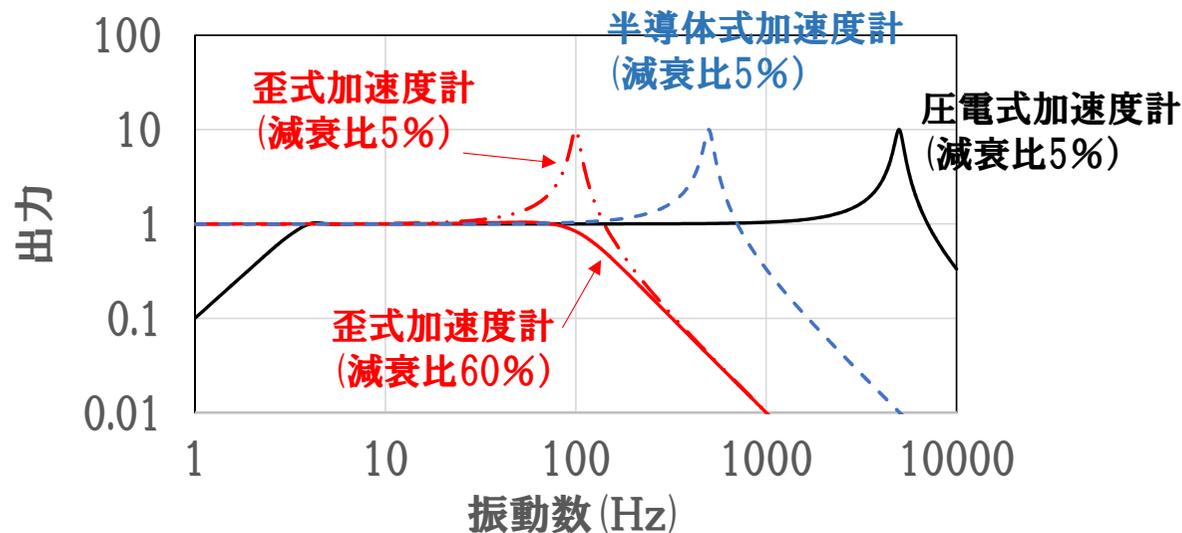
③ 検出器の特性把握

i) 検出器の測定レベル範囲、応答性(周波数特性:振幅、位相)、感度、S/Nは現象を正しく把握するために必要です。

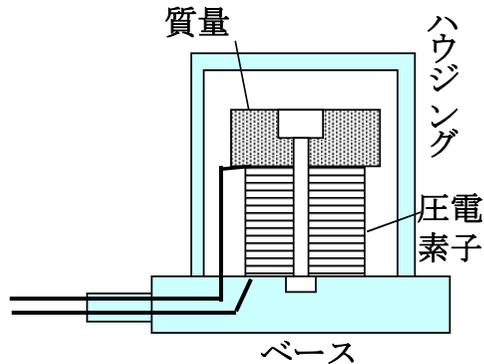
検出器には必ず測定可能なレベル範囲や検出器の応答特性(これは検出器の固有振動数と減衰比により決まる)があります。その仕様を調べ、先に予測した測定したい振動の振幅レベル、振動数範囲、を満足する検出器を選びます。

検出器の感度は高い方がS/N比も高く計測精度上有利ですが、先ほど述べたように同じ形式の検出器では一般的に感度の高い検出器は周波数特性が劣ることになります。

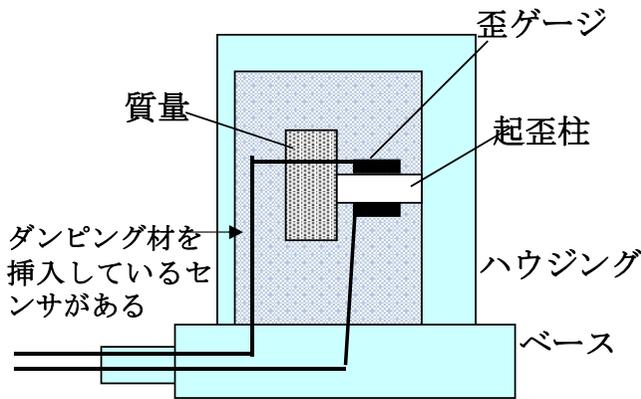
例えば、歪式、半導体式、圧電式加速度計の応答特性例は次のようです。もちろん、検出器の大きさ、重さ、構造などにより特性は変化します。



代表的な加速度計の構造と長短所を以下に示します。参考にして検出器の選定を行ってください。



圧電型(圧縮) 加速度計



ひずみ型加速度計

種類	メリット	デメリット	適用例
圧電式	<ul style="list-style-type: none"> ・構造が簡単、堅牢である。 ・使用可能な振動数範囲が広い。 ・ダイナミックレンジが広い。 ・特殊環境に耐える。 ・小型軽量である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・静的成分の計測が不可能 ・専用のケーブルと増幅器が必要である。 ・温度変化の影響を受易い ・非ダンピングである。 	<ul style="list-style-type: none"> ・一般機械、自動車の振動、衝撃計測 ・各種研究用振動、衝撃計測 ・高温高圧下の振動計測
歪ゲージ式 (半導体ゲージ式)	<ul style="list-style-type: none"> ・取り扱いが容易である。 ・静的成分の計測が可能である。 ・校正が容易である。 ・ダンピング構造が可能である。(振動数測定範囲を広げる) ・半導体式あるいはMEMS式は非常に小型である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高振動数域の周波数特性にやや劣る。 ・高温高圧下での使用に耐えない。 ・耐振動/衝撃の許容範囲が相対的に低い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・土木、建築構造物の振動、衝撃計測 ・各種研究での振動衝撃計測 ・自動車の衝撃計測
静電容量式 (MEMS)	<ul style="list-style-type: none"> ・非常に小型である。 ・静的成分の計測が可能である。 ・校正が容易である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・非ダンピングである。 ・横感度の影響が少ない。 ・高温高圧下での使用に耐えない ・高振動数域の周波数特性にやや劣る 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動車の加速度
光ファイバ式	<ul style="list-style-type: none"> ・耐電磁ノイズ性に優れている。 ・静的成分の計測が可能である。 ・多重計測の可能性が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファイバケーブルの取扱性に熟練が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・今後スマート構造物などへの適用性が見込める

ii) 耐環境性、安定性

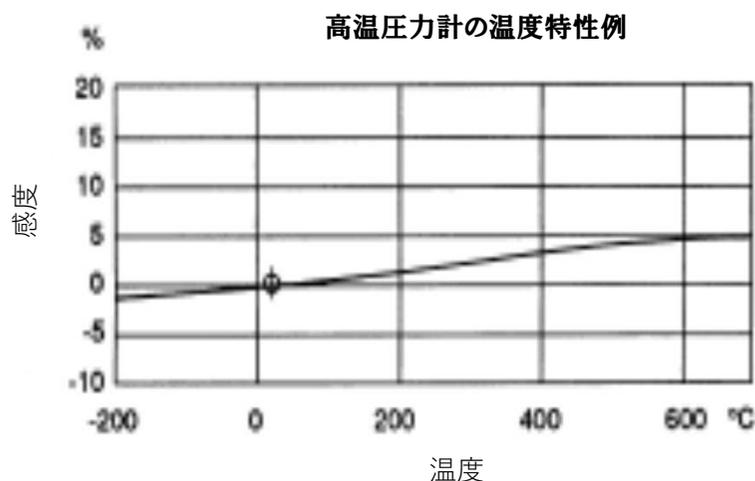
耐環境性としては、温度、振動や衝撃、圧力に対する耐性や防水性があります。
測定対象物の使用環境下において振動測定が可能な検出器を選定する必要があります。



例えば、長時間計測時のゼロ点の変化や、温度による感度の変化が少ない安定した検出器（増幅器を含む）の選定が必要です。

下表は圧電式変換器の温度に対する感度変化や歪式加速度検出器のゼロ点の変化率、出力の温度影響などを示しています。

歪式加速度計の仕様 共和電業(株)総合カタログより一例抜粋



性能		環境特性	
定格容量	±1G	温度保証範囲	5~40°C
非直線性	< ±1%R0	許容温度範囲	-15~65°C
ヒステリシス	< ±1%R0	零点の温度影響	< ±1%R0/°C
定格出力	0.5mV/V ± 20%	出力の温度影響	< ±1%/°C



④ 検出器が計測結果に及ぼす影響度把握

i) 検出器の質量が固有振動数に及ぼす影響について説明します。

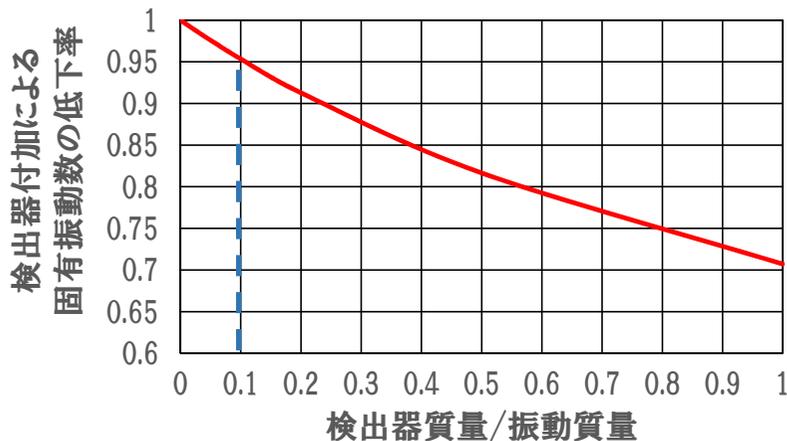
センサの質量(大きさ)とセンサの固有振動数、検出感度の関係ですが、一般的に同じ原理の加速度検出器を考えた場合、
(ア) センサが大きいものは検出感度は高いので小振幅の振動を精度良く測れますが、一方、センサの固有振動数が低くなっているため、計測可能な振動数範囲の上限は低くなります。

(イ) その反対にセンサが小さいものは検出感度は低いのですが、計測可能な振動数範囲の上限は高くなります。

また、センサを取付ける事により、測定対象物の質量が少し増えることになり、その結果固有振動数が低下します。従って、被測定物の質量が小さい場合には検出器の質量も小さいものを選ぶことが必要です。

下図は検出器の質量と非測定物の振動質量の比率と固有振動数の低下率の関係を示しています。

検出器質量が固有振動数に及ぼす影響



例えば、振動質量が1kgの被測定対象に0.1kgの検出器を取り付けた場合、質量の比率(横軸)は0.1ですので、被測定物の固有振動数は約5%低くなります。強制振動の振動数は変化しませんが、その成分の振幅は変化します。

(注) 連続体の場合などの高次振動モードに対しては振動質量が小さくなると考えられるためその分検出器の影響が大きくなります。

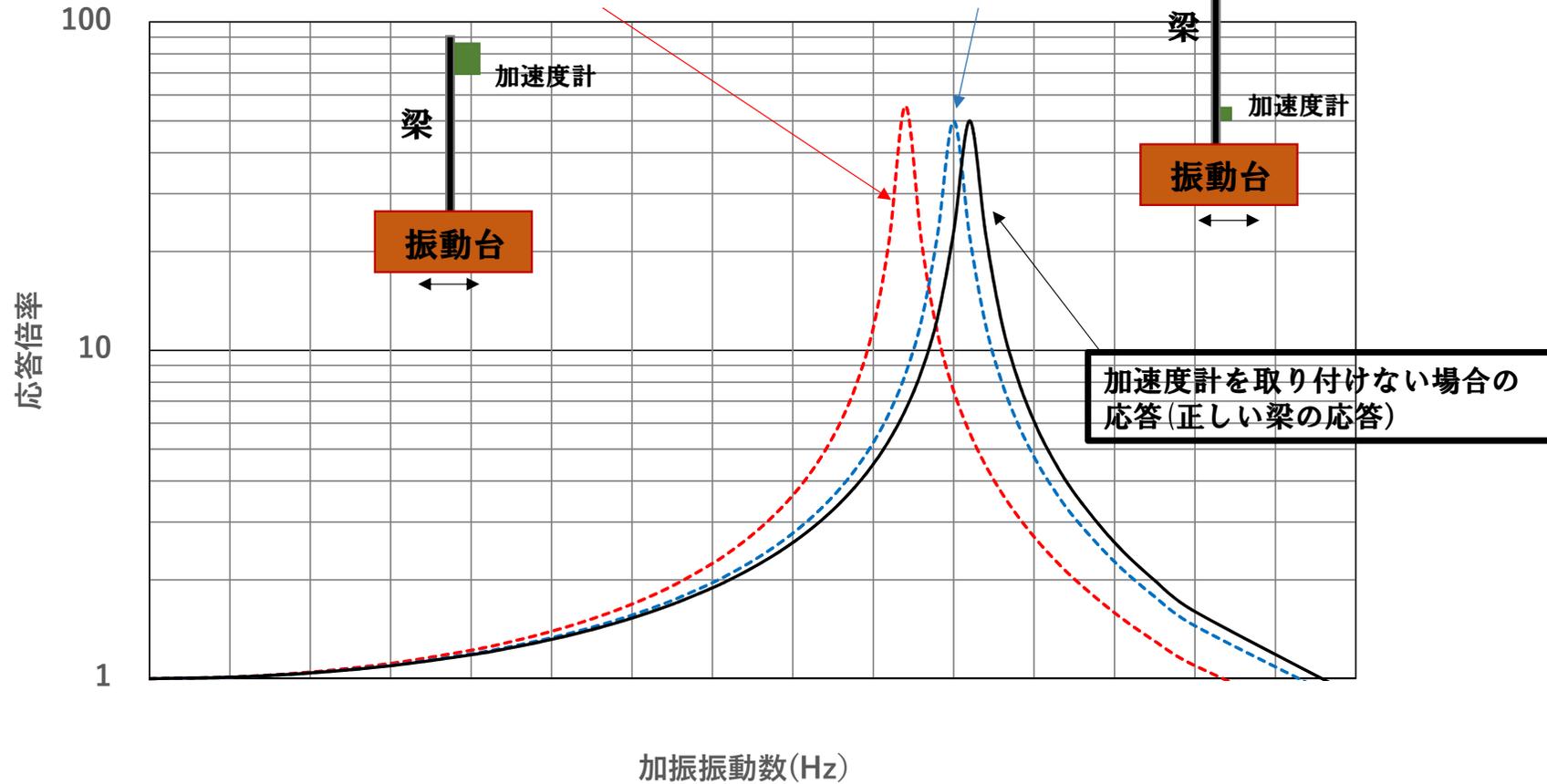
検出器質量が供試体の共振曲線に及ぼす影響図

大きい加速度計を自由端に取り付けた場合。

→梁の固有振動数が見かけ上低下する。
(取付け位置の影響も大きい)

小さい加速度計を固定端近くに取り付けた場合。

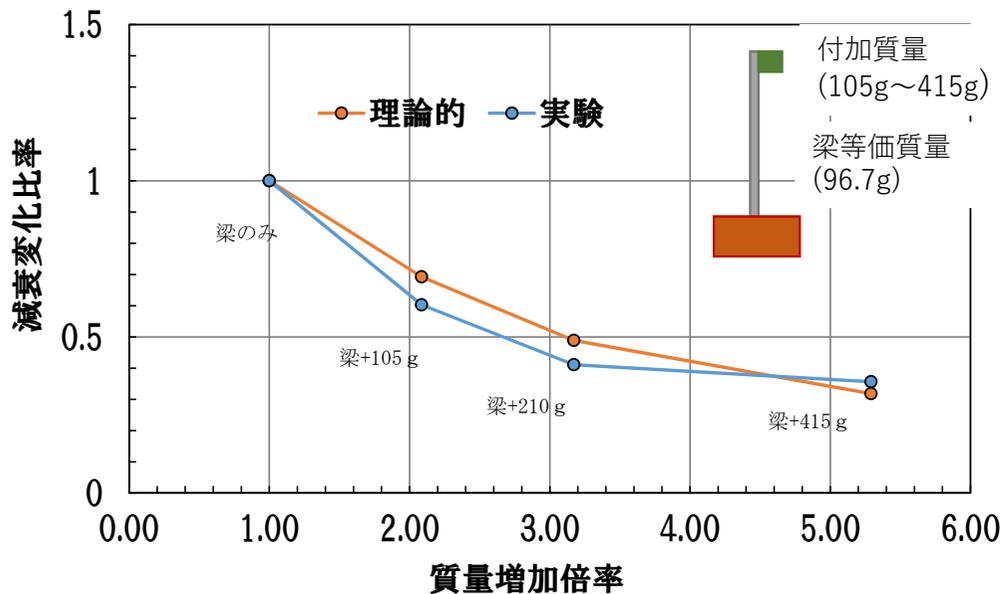
→梁の固有振動数低下の影響は少ない。
(取付け位置の影響も少ない。ただし計測される
加速度レベルは小さくなる)



ii) 検出器の質量が減衰比に及ぼす影響について説明します。



片持ち梁の上端の付加質量と減衰との関係



左図は付加質量をパラメータに梁の先端に付加した場合の減衰比の変化を示しています。付加質量が梁の等価質量(この場合梁全体の質量の $\approx 1/4$)とほぼ等しい検出器を取り付けると減衰比は付加質量が無い場合に比べて、約70%程度に小さくなることがわかります。

実はこの傾向は検出器の質量が固有振動数に及ぼす影響と同じ影響になります。(図では横軸が固有振動数の場合と違っているので判りにくくなっています)

結論: 検出器を対象物に取り付け、振動を測る場合には少なからず固有振動数と減衰比を低下させる影響があることを理解し、適切な検出器を適切な位置に取り付けて計測し評価すること。

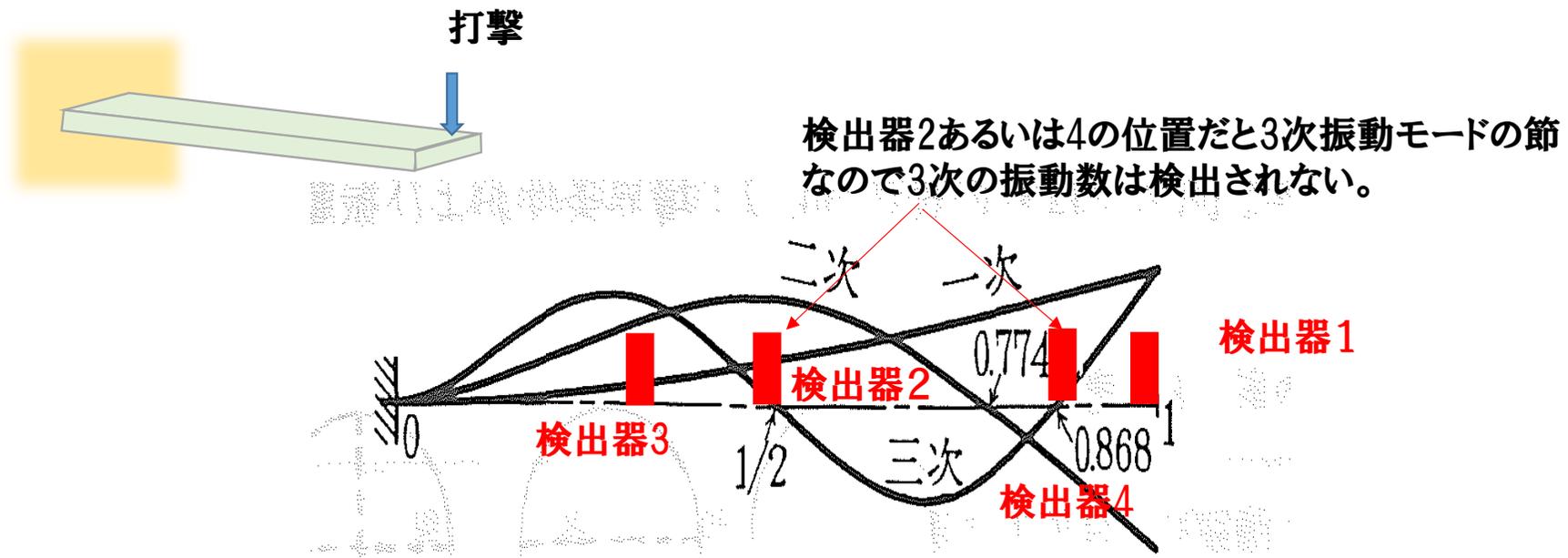
iii) 検出器の取付位置、方法が振動特性に及ぼす影響について説明します。



検出器を対象物のどの位置にどのように対象物に取付けるか。取付け位置や取付け方法の違いによる応答特性や調査対象としている振動現象に与える影響などを考慮する。

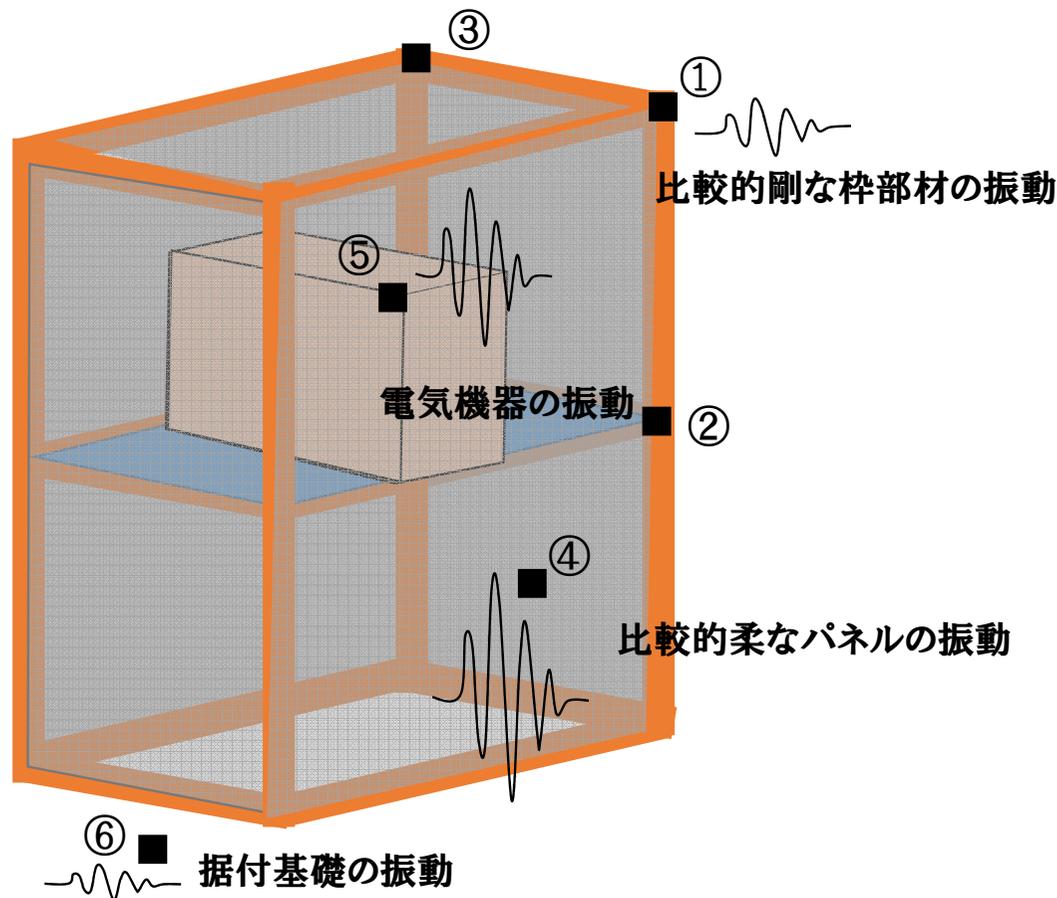
(A) 取付け位置の影響: 例(1)

検出器を取り付ける位置によっては検出できない振動数があります。例えば、下図の検出器2の位置(3次振動モードの節)に取り付けると、そのモードの振動数は検出できません。検出器1の位置だと、検出器の質量が梁の固有振動数に与える影響が大きくなります。



取付け位置の影響:例(2)

測定対象物が例えば配電盤のような骨枠組み(剛部材)とパネル板(柔部材)が組み立てられた構造体の場合には、計測目的に応じ、検出器を取り付ける箇所を選定する必要があります。



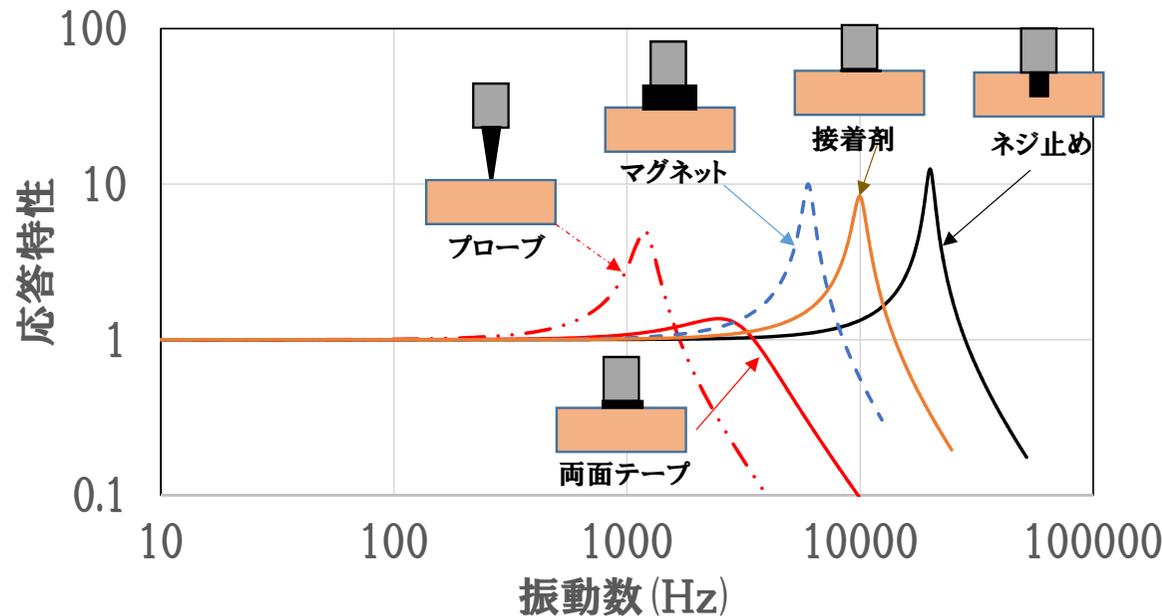
盤全体としての振動に注目するのであれば検出器の取り付け位置(振動計測位置)は左図における①、②、③など構造体として剛と考えられる位置です。例えば④のようなパネルに検出器を取り付けると盤全体の振動以外のパネルの局所的な振動も含まれることになります。

一方、盤内の電気機器の振動や、パネルの損傷に注目するのであれば、検出器の取り付け位置は当然④や⑤になりますが、その場合にも①～③は計測点として位置づけることにより、問題となる事象が盤全体の振動によるものなのか、あるいは局所的な振動によるものなのかの判定が容易になります。

(B) 検出器の取付け(固定)方法による周波数特性の違い

検出器選定時には検出器の固有振動数を考慮する必要があることは既に述べましたが、検出器を測定対象物に取り付ける方法によっても測定可能な周波数範囲が異なりますので注意が必要です。

下図にその例を示しますが、ネジ止めが最も望ましいことがわかりますが、計測時に必ずねじ止めできるとは限りません。例えば、測定対象物が製品などの場合はネジをきることは出来ません。その場合には取付けによる振動特性を理解した上で次善の取り付け方をする必要があります。



左図は大まかな傾向を示します。取り付け共振振動数は
①検出器のサイズ、
②検出器と測定面の粗度、
③接着剤やテープの厚み、
④プローブのサイズ、
により変化します。

検出器の選定、取付方法が決まったら、次の手順で計測します。



- i) ブロック線図に従って結線する。
- ii) 必要に応じ、増幅器、分析器のバランス調整や感度調整などを行う。
- iii) 検出器のノイズレベルを確認する。
ノイズは少なからず存在する。ノイズレベルは小さい程よいが、完全になくすることは困難な場合が多い。
そのノイズレベルが測定しようとしている計測レベルより十分に小さければ問題ないものとして次ステップに移る
(エンジニアリングジャッジが必要)
- iv) 検出器近傍を軽く打撃し、所定の位置に所定の検出器が正しく取り付いていることを確認する。
併せて、信号出力が正常であることを確認する。
- v) 計測を開始する。
- vi) 計測中はモニターにより増幅器、分析器の入力オーバーなどを監視し、必要に応じ適正な感度調整を行う。
- vii) 計測条件(回転数、負荷、流量、試験ケースなど)はメモするとともに、オンライン分析データ上の卓越振動数や振動レベル、その時々が発生した特異事象などをメモしておけば、分析時の効率化が図れる。

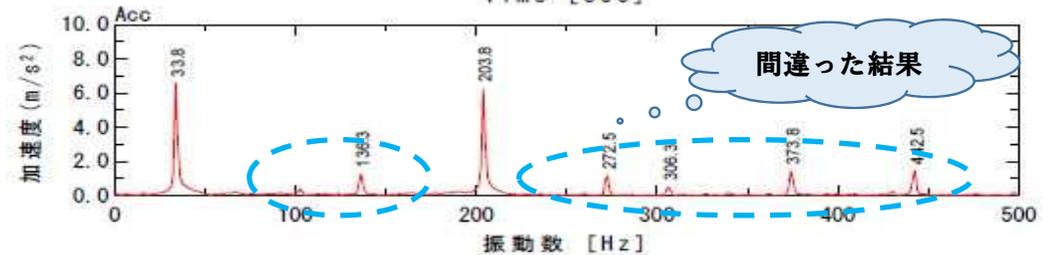
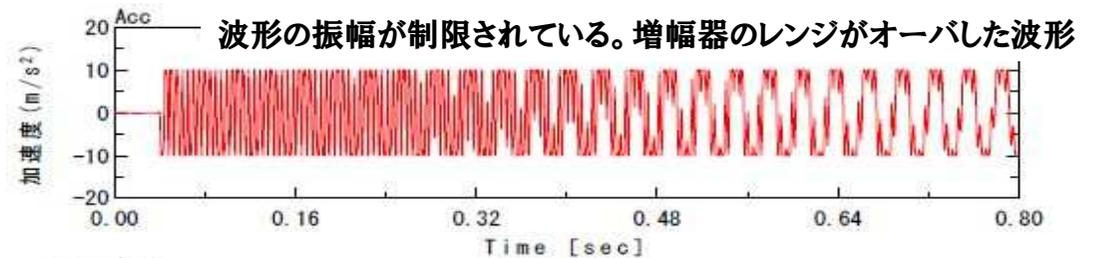
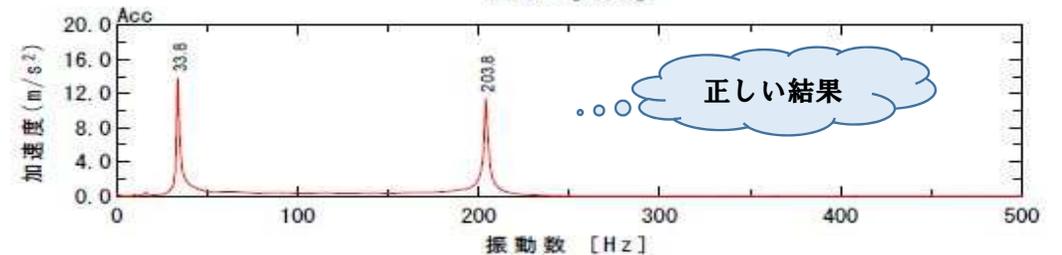
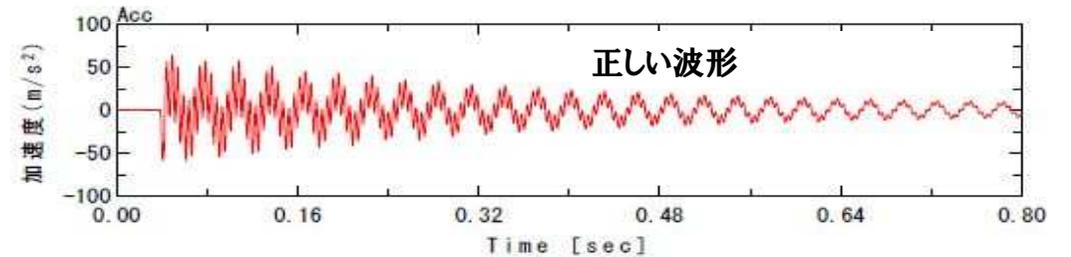
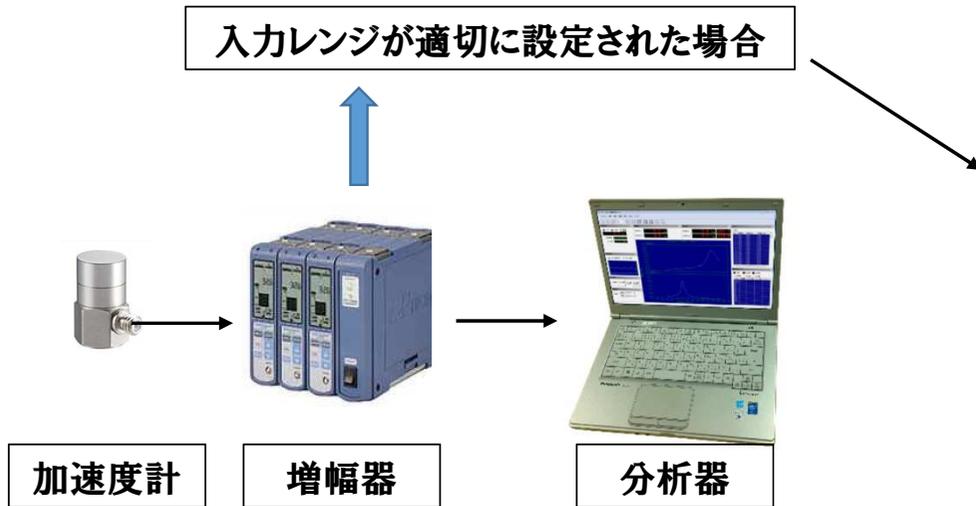
ノイズの種類とその対策

計測を行う上で最も厄介で苦勞するのがノイズ発生の問題であり、ノイズが発生した時の対策はケース バイ ケースにより、トライ アンド エラーで対処する必要がある。

下表はノイズの種類と対策の例を示すが、実際のノイズは原因が重複していることもあり、対策を困難にしているため、参考程度の位置づけとして考えること。

ノイズの種類	原因	対策	備考
電磁誘導ノイズ	周囲の磁界(周囲の機器に電流が流れていると発生している磁気空間)が変化することにより発生するノイズ。	信号線としてツイストペア+シールド線を使用する。 信号線と動力線は分離する。 差動アンプや絶縁トランスを使用する。	歪ゲージ式/ 圧電式
静電誘導ノイズ	周囲の電界が変化することにより発生するノイズ。	信号線としてシールド線を使用する。	圧電式
グラウンドループノイズ	センサ(測定対象物)と計測機器間や複数個の測定器間に電位差があり、両者を接地した場合などに発生する。	基本的には1点接地とする。	歪ゲージ式/ 圧電式
ベースストレインノイズ	センサ取付け箇所歪が生じた場合、センサ自身(素子)もその歪の影響を受け、ノイズとなる。	シェアタイプのセンサなど歪感度の低いセンサを選定する。	圧電式
ケーブル振動(摩擦電気)ノイズ	ケーブル内の導線と絶縁材が振動すると両者間に摩擦による電荷が発生し、その電荷がノイズとなる	ケーブルを固定する。特にセンサ出口近傍のケーブルは固定する。	圧電式
パイロ効果によるノイズ	センサ素子(圧電)が温度変化を受けると圧電素子の表面電荷が変化し、発生する。	センサ表面に急激な温度変化が生じない様カバーなどを設ける。	圧電式
センサ絶縁低下ノイズ	センサ自体の絶縁が低下した場合に発生する。	経験上、歪ゲージの場合は数10MΩ以上、圧電式センサの場合は数MΩ以上	歪ゲージ式/ 圧電式
外部音響ノイズ	外部音響(圧力変化など)を受けた場合に発生する。	センサハウジング部にカバーを取付、センサに働く圧力変動を低減させる。	圧電式

増幅器などアンプ入力レンジオーバーした状態で計測した場合



振動の周波数と振幅を求める方法について説明します

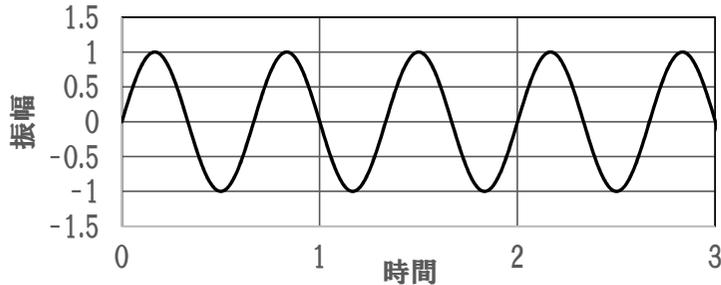
検出器から得られる信号は通常時刻暦波形です。この時刻暦波形から振動数を求めるには、**周波数分析器を用いた分析**を行うことが一般的です。分析器がない場合は波形から周期を読み取り、その逆数として振動数を求めることも出来ますが、複雑な波形の場合は難しくなります。

振幅も**周波数分析結果**の振幅から求めることが出来ますが、この場合、波形から求めた**最大振幅**とは異なる場合があります。単一振動数の信号の場合は両者は一致しますが、通常複数振動数が重ねあった振動の場合には両者は一致しないことがあります。例題を下図に示します。



時刻暦波形

1次成分の単一振動数で振幅が±1の信号

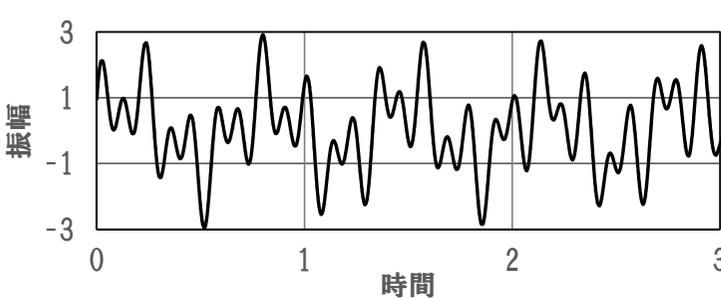


時刻暦波形最大振幅
= スペクトル振幅

スペクトル分析結果

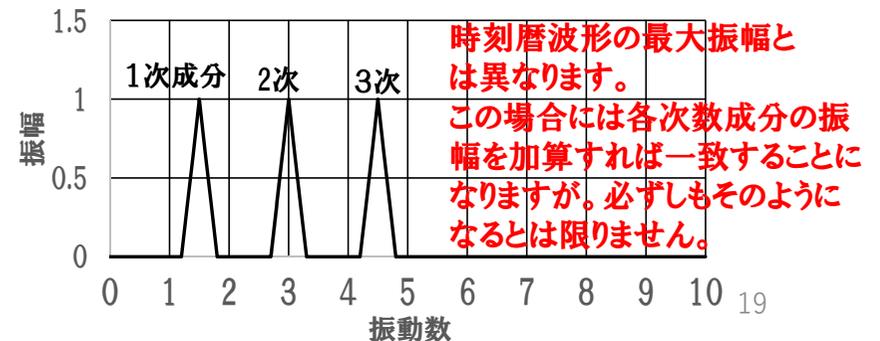


1~3次成分振動数の振幅が±1の信号



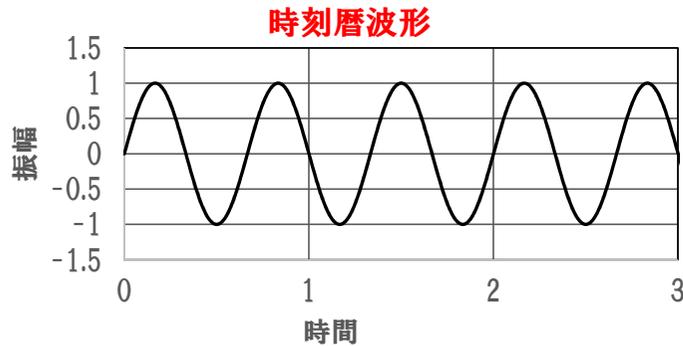
時刻暦波形最大振幅
≠ スペクトル振幅

周波数分析した結果は
1~3次成分の振幅が±1の出力になっています。

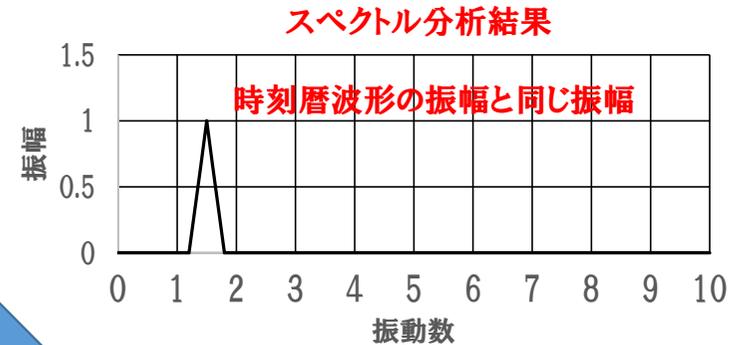


時刻暦波形が定常的でない場合における時刻暦波形振幅とスペクトル分析振幅の関係

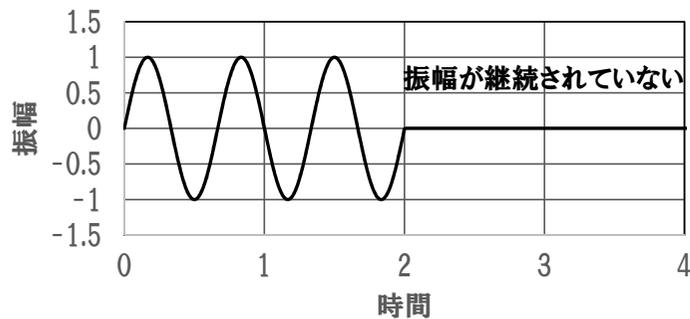
FFT分析はデータ評価時間統計的に定常の波形が継続していると仮定し、分析した結果が求まります。従って、下図(下段)に示すように評価時間内に信号がなくなっている場合の分析結果振幅は小さくなるので、注意してください。



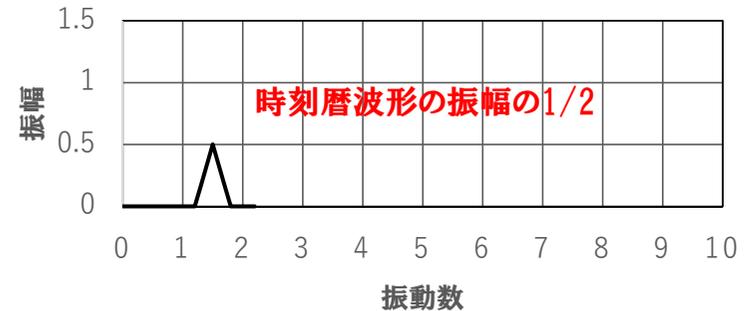
信号が全区間続いているのでスペクトル分析結果の振幅は同じ(単一振動数)。



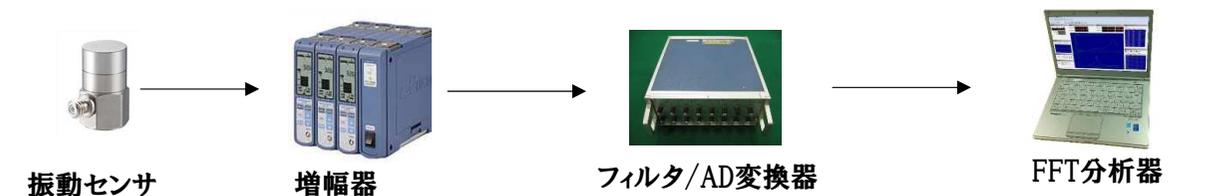
FFT分析器



信号が全区間続いていないのでスペクトル分析結果の振幅は下がる。実際の場合には窓関数という重み付け関数の影響により振幅の変化率は変わります。



周波数分析におけるデータサンプリングとエイリアジング

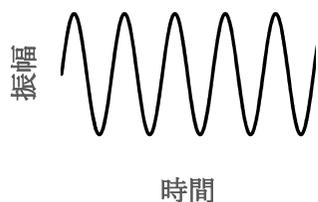


振動センサ
振動を検出する。

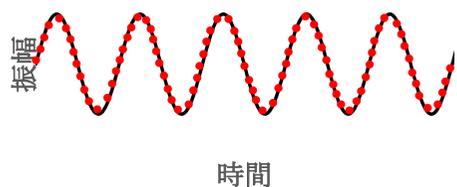
増幅器
センサの信号を電圧
あるいは電流に変化
し、増幅する。

フィルタ/AD変換器
アナログ信号を決められ
た時間間隔(サンプリング
周波数)でデジタル数値化
する

FFT分析器
デジタル数値化し
たデータをFFT演算
する。



得られる信号波形



デジタル化した信号(赤丸)

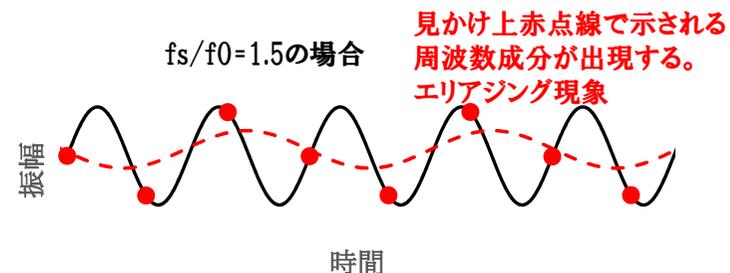
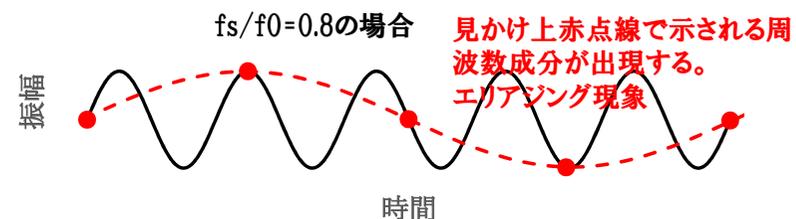
右図に示すように、サンプリング周波数に比べ信号成分に高周波の信号が存在していると、デジタル化の際、エイリアジング現象が出現するのでローパスフィルタ(エイリアジング防止フィルタ)が必要。

アナログ信号を忠実にデジタル化するため
十分に早いサンプリングを行った場合
・アナログ波形の再現性は充分である。
しかし、
・データ量が非常に多くなりすぎる。
・FFT分析後の周波数分解能が悪くなる。

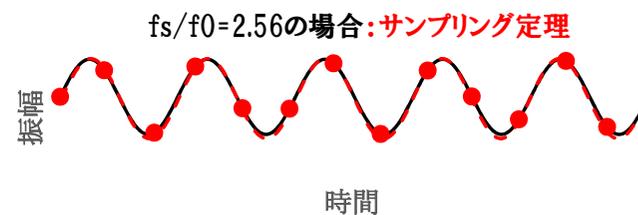
次ページのエイリアジングフィルタにより必要でない高周波数成分を除去し、サンプリング定理を適用し、適切にFFT分析を行う

サンプリング周波数 (f_s) とアナログ信号周波数 (f_0) の関係

サンプリング周波数が低い場合: 不適切な例

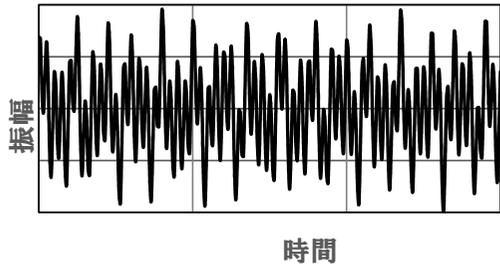


適切なサンプリング周波数の例 エイリアジング現象は生じない。



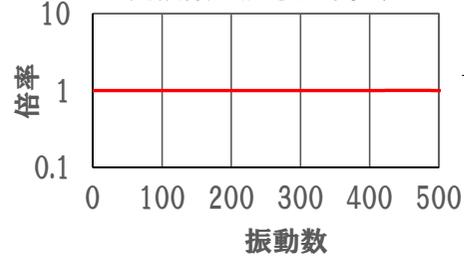
エリアジングを防止するためのフィルタ処理

計測された振動波形



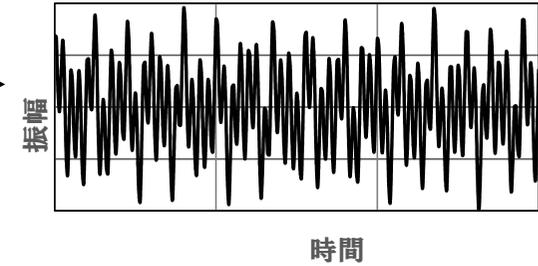
ローパスフィルタの特性

①フィルタ無 (またはカットオフ周波数が信号より高い)

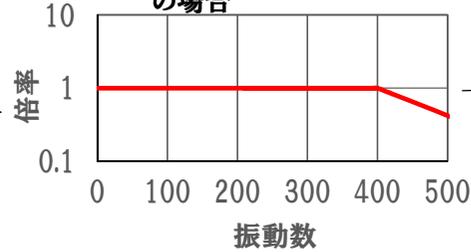


ローパスフィルタ通過後の信号

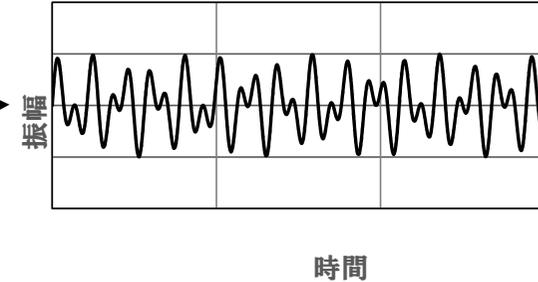
①フィルタ無:元の波形と同じ。



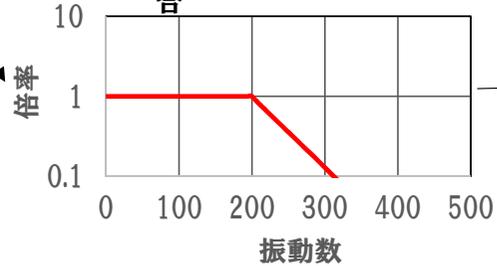
②カットオフ周波数が中程度の場合



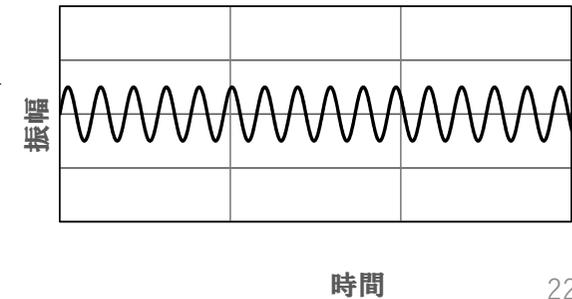
②最も高い周波数成分が除去されている。



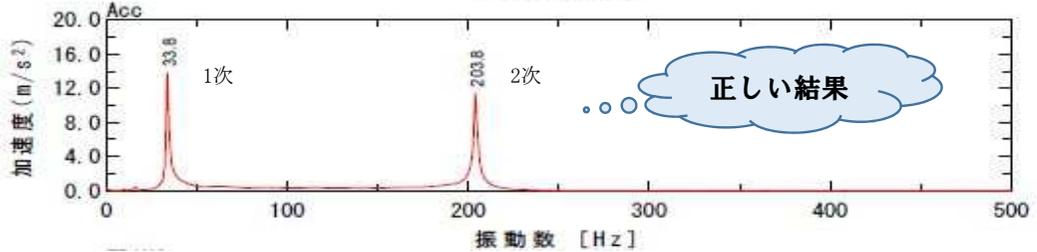
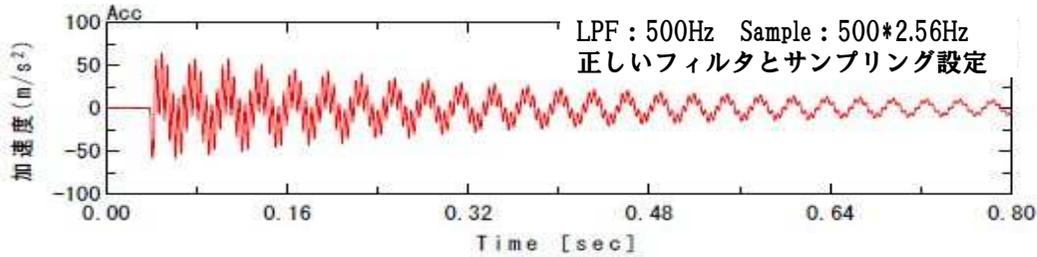
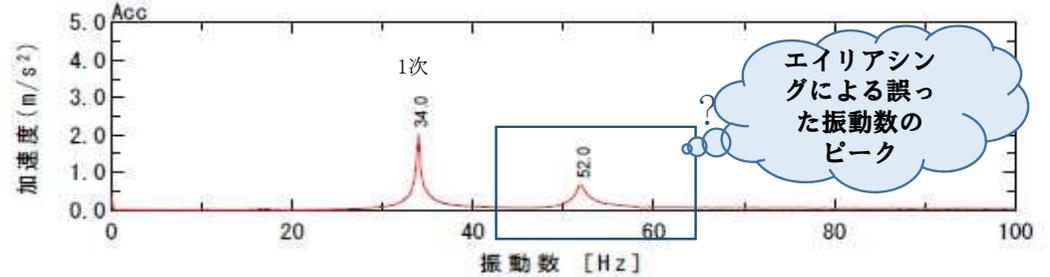
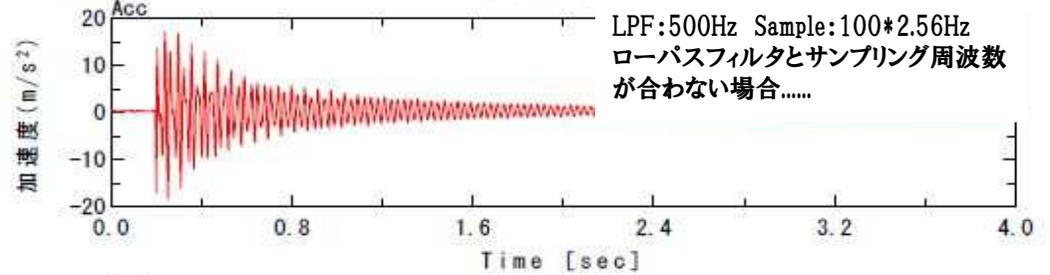
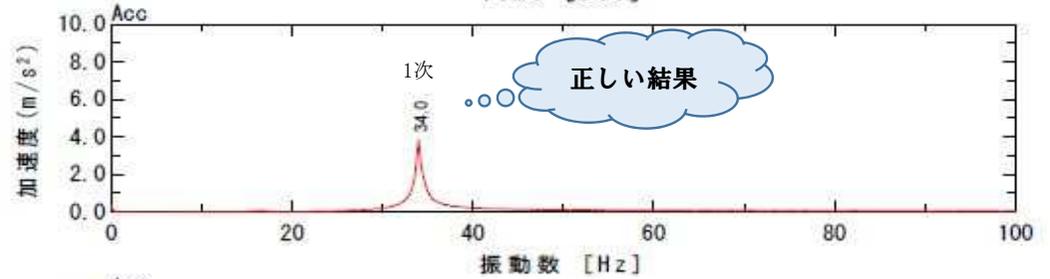
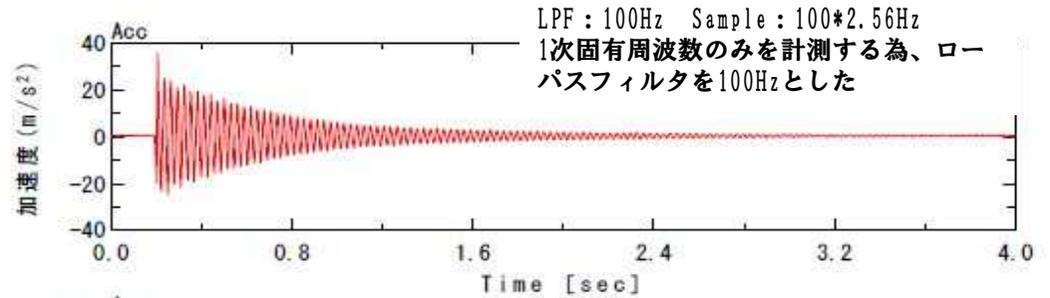
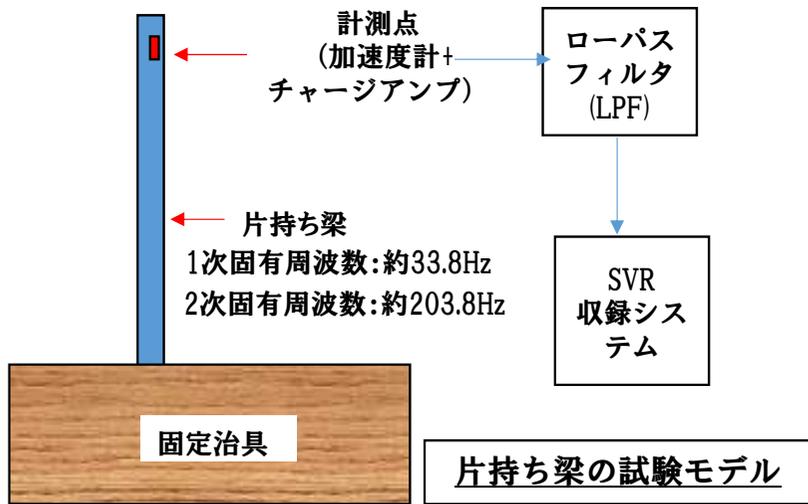
③カットオフ周波数が低い場合



③最も低い周波数成分のみ残された波形。



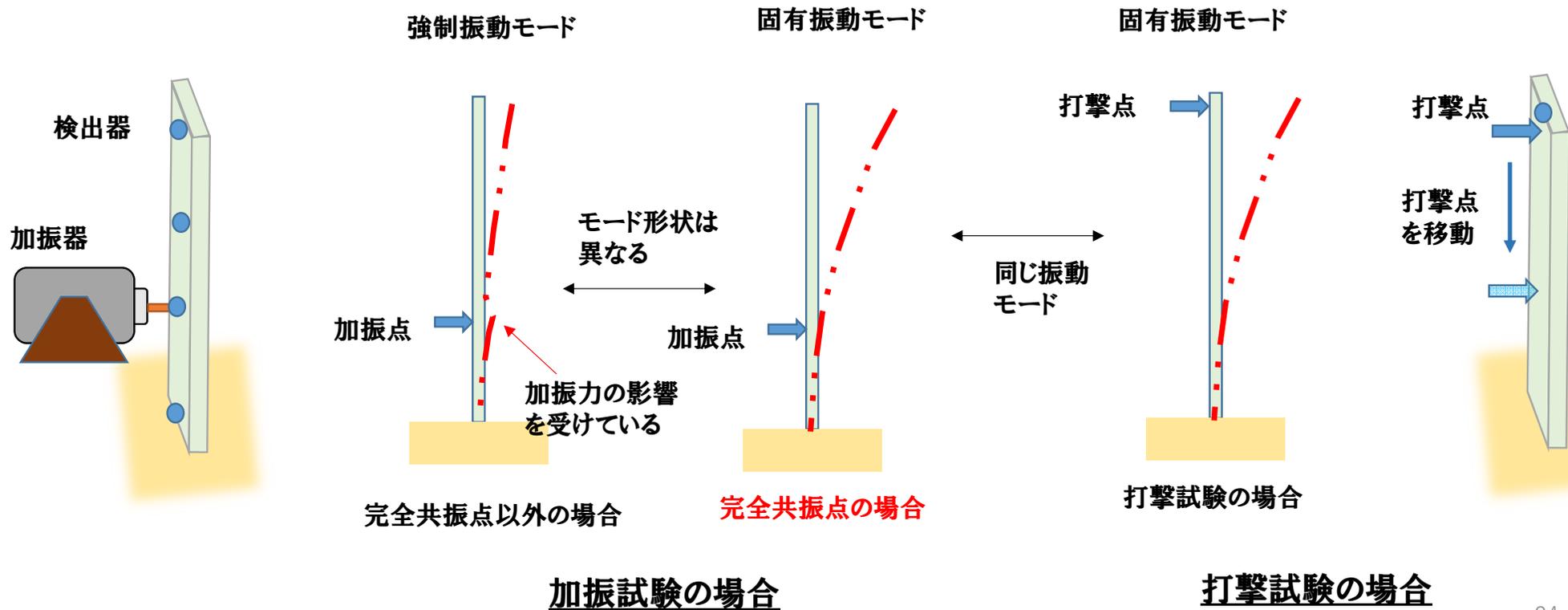
アンチエイリアジングフィルタ、サンプリング周波数による実際の試験データ例



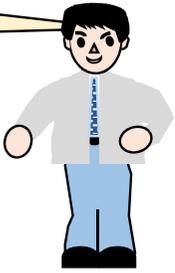
固有振動数、減衰比、振動モードについては「なるほどシリーズ1」で説明していますので参考にしてください。

ここでは、固有振動モードと強制振動モードの違いについて簡単に説明します。

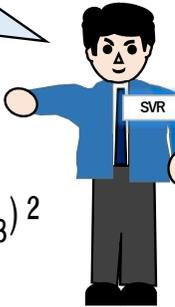
下図に示すように強制振動モードは加振力の影響を受けますが、加振試験における共振点の振動モードや打撃試験における振動モードは力の影響を受けていない固有振動モードになります。



初歩的なことかもしれませんが、変位振幅、速度振幅、加速度振幅の関係について教えてください



そうですね。加速度計を用いて振動計測し、その結果から変位振幅を知りたい場合や、その反対に変位計による計測結果から速度や加速度を知りたい場合があります。
 加速度→変位や変位→加速度の変換は積分器や微分器あるいは数値計算で可能ですが、ここでは周波数分析結果から換算する方法について説明します。



変位から加速度の換算

加速度振幅 = 同じ振動数に対する変位振幅 * ω^2

左図の例： $a_1 = d_1 * (2 * \pi * f_1)^2$ 、 $a_2 = d_2 * (2 * \pi * f_2)^2$ 、 $a_3 = d_3 * (2 * \pi * f_3)^2$

変位から速度の換算

速度振幅 = 同じ振動数に対する変位振幅 * ω

$a_1 = d_1 * (2 * \pi * f_1)$ 、 $a_2 = d_2 * (2 * \pi * f_2)$ 、 $a_3 = d_3 * (2 * \pi * f_3)$

加速度から変位の換算

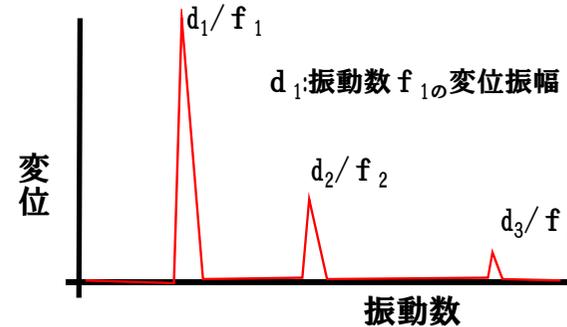
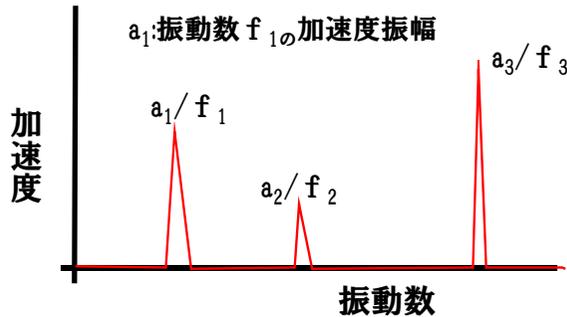
変位振幅 = 同じ振動数に対する加速度振幅 / ω^2

左図の例： $d_1 = a_1 / (2 * \pi * f_1)^2$ 、 $d_2 = a_2 / (2 * \pi * f_2)^2$ 、 $d_3 = a_3 / (2 * \pi * f_3)^2$

速度から変位の換算

変位振幅 = 同じ振動数に対する速度振幅 / ω

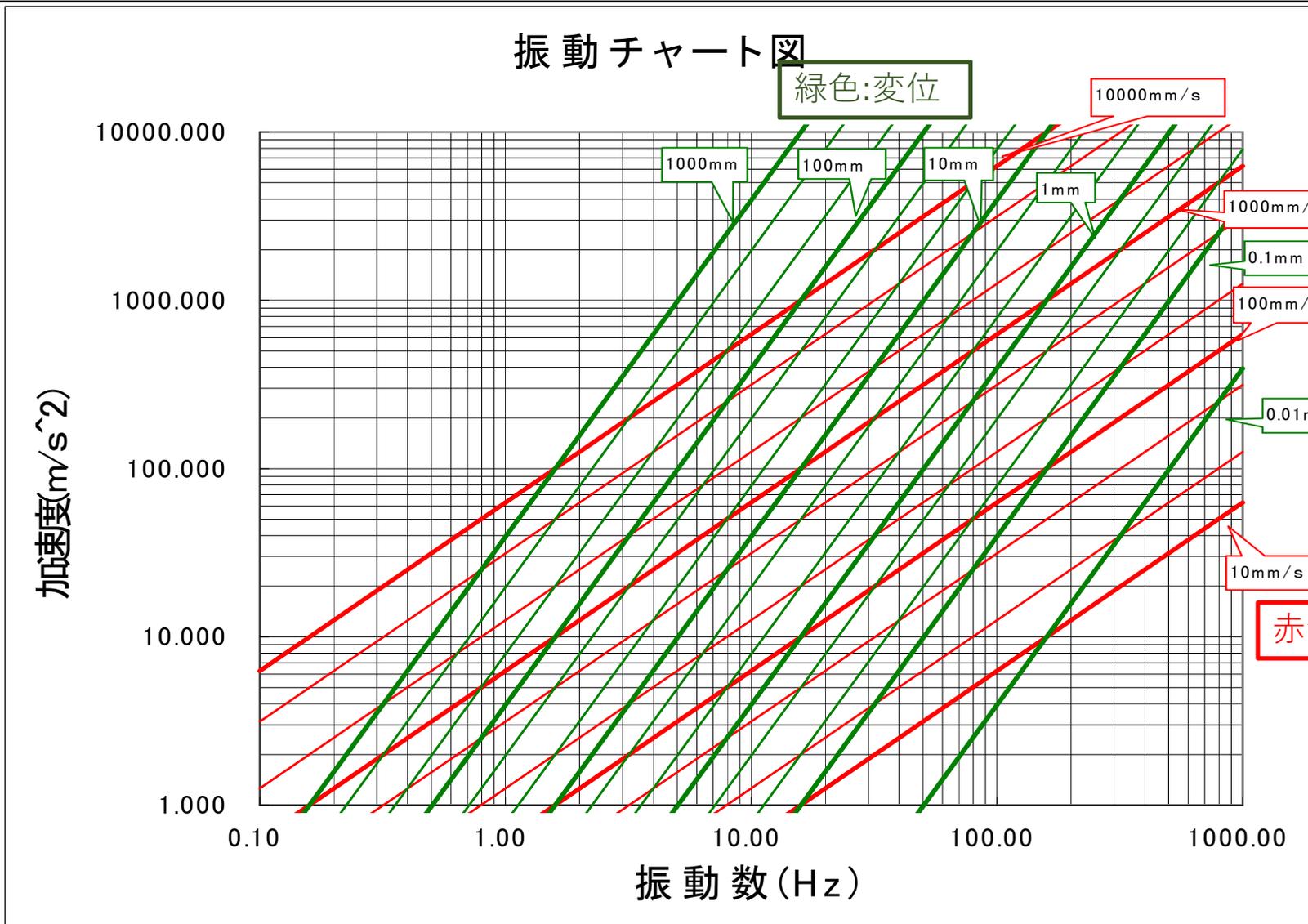
$d_1 = a_1 / (2 * \pi * f_1)$ 、 $d_2 = a_2 / (2 * \pi * f_2)$ 、 $d_3 = a_3 / (2 * \pi * f_3)$



$$\omega (\text{円振動数}) = 2 * \pi * f$$

注) 換算は同じ振動数成分についてのみ有効である。

おまけ① 加速度・速度・変位の換算に便利なチャートです。

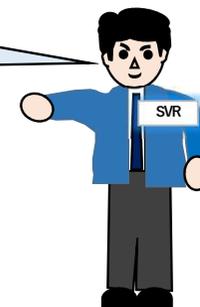


おまけ② 周波数応答関数について

周波数領域における線形系の入出力の表し方(表現方法)を下表に示します。

表 各種の周波数応答

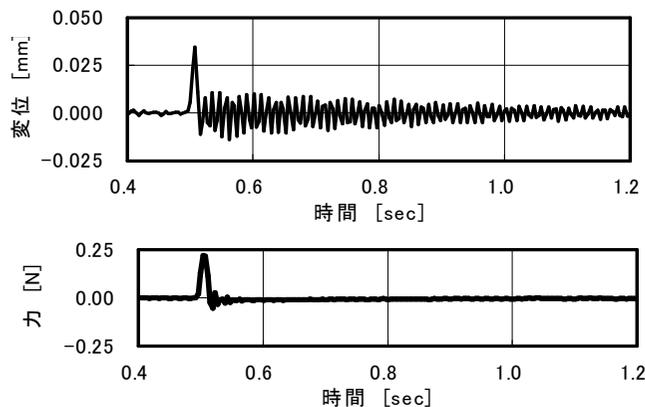
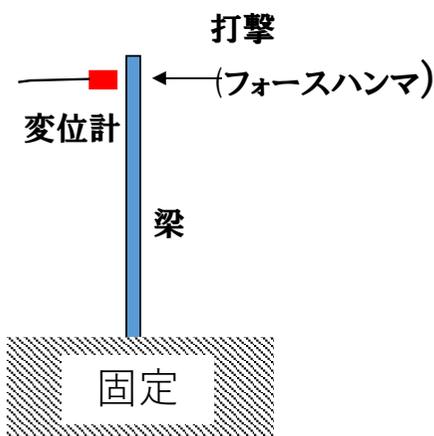
周波数応答関数		周波数応答関数の逆数	
名称	定義式	名称	定義式
イナータンス	加速度／力	(動的)質量	力／加速度
(機械)モビリティ	速度／力	(機械)インピーダンス	力／速度
(動)コンプライアンス (リセプタンス)	変位／力	(動的)剛性	力／変位



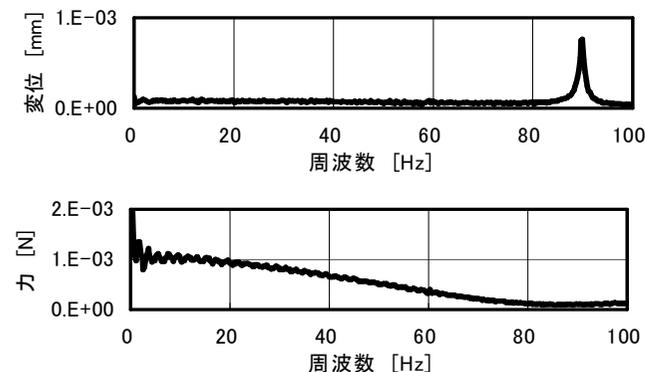
おまけ③周波数応答関数の応用例:コンプライアンスと動剛性の例

下図の左側に示すような梁を対象に打撃試験を行い、変位と打撃力を計測し、コンプライアンスと動剛性を計測した。

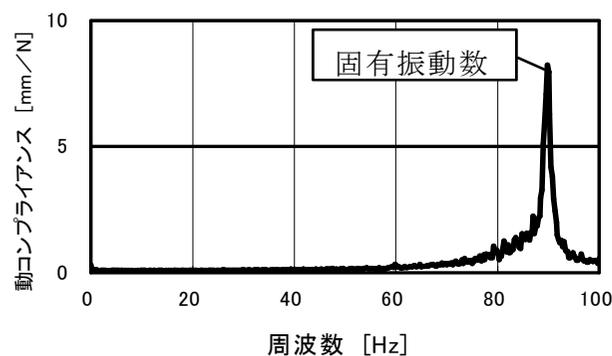
- ・動剛性の結果における周波数ゼロ近傍の縦軸の値は静的な力が梁に作用した場合に得られる静剛性に等しい。
- ・コンプライアンスにおける縦軸は単位力あたりの変形量を示し、周波数ゼロ近傍の変位量は静的荷重試験における梁の変位量に等しくなる。
(同一荷重を作用させ、共振した場合の梁の変位量は静的な荷重による変位量に比べどれ位大きくなるかが理解できる)



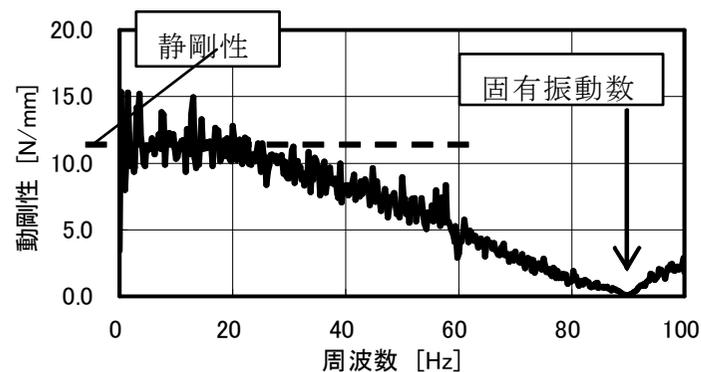
(a)時刻例波形



(b)周波数分析結果



(c)コンプライアンス



(d)動剛性

おまけ④ 周波数分解能 (Δf)について

一般的なFFT分析器における周波数分析範囲の上限を $f_{\max}=100\text{Hz}$ とした場合の例について波形のサンプリング周波数、波形取り込み時間、周波数分解能について説明します。

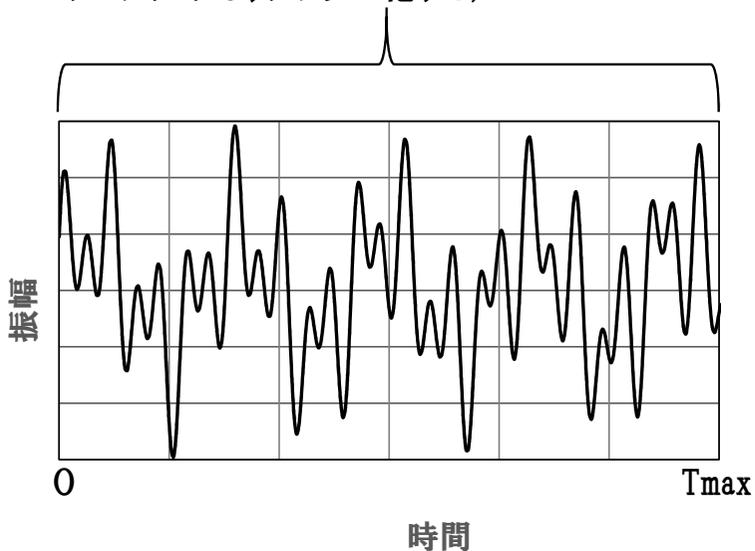
波形のサンプリング(デジタル化)と取り込み時間、周波数分析結果の表示方法

$f_{\max}=100\text{Hz}$ の場合、サンプリング定理によりサンプリング周波数は f_{\max} の2.56倍の $f_s=256\text{Hz}$ になります。

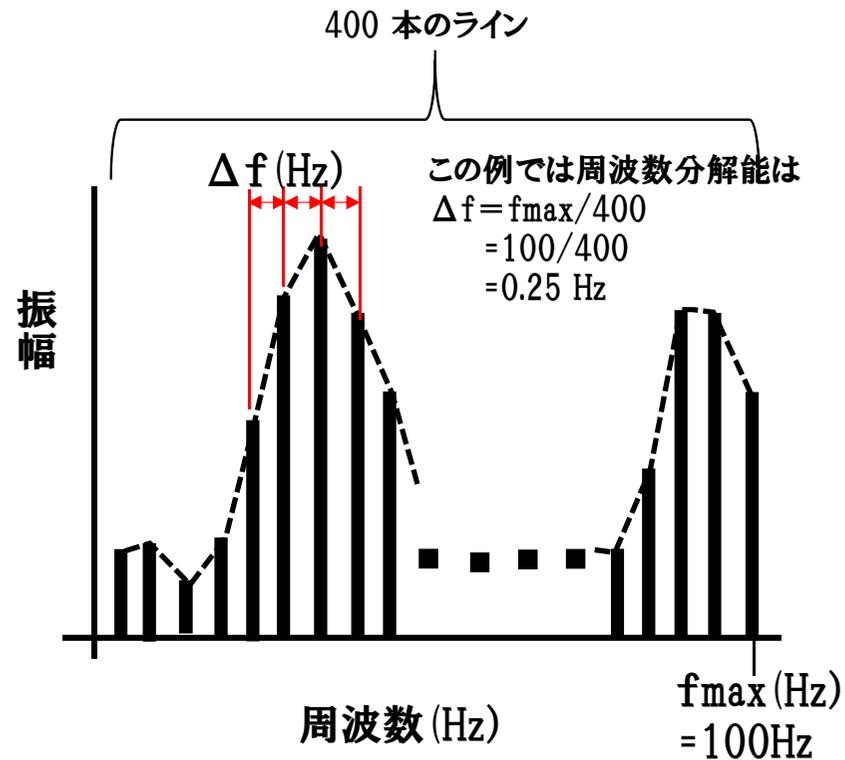
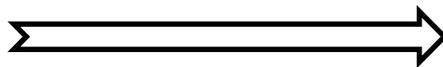
サンプリングポイント数を1024ポイントとすると、 $T_{\max}=1024*(1/256)=4\text{秒}$ になります。

取り込んだ1024ポイントに対しFFT演算を行い、エリアジングの影響をよりなくすため、得られた1024ラインのうちの $(1/2.56)$ に相当する400ライン分を分析結果として採用し、残る624ラインは捨てています。

4秒間の波形を $(1/256=3.9\text{m秒})$ ごとに1024ポイントサンプリングし、デジタル化する



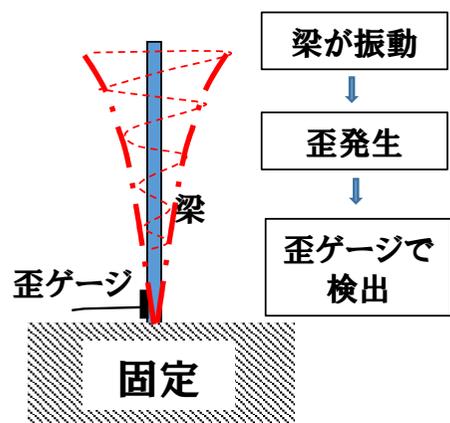
FFT演算処理し、エリアジングの影響をよりなくすため、400ライン分を周波数分析結果として表示する。



おまけ⑤ 歪ゲージの使い道はいろいろ

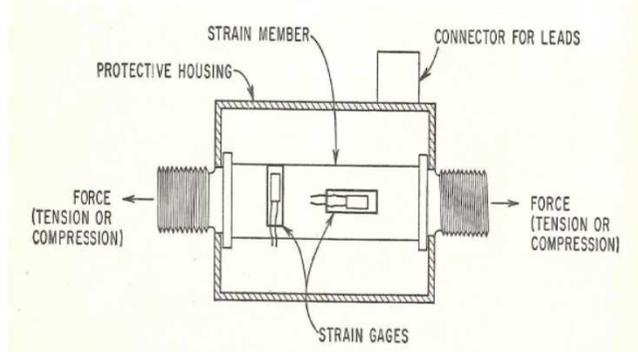


歪ゲージは言葉どおり解釈すれば対象物に生じている歪量を計測する素子ですが、歪ゲージを対象物に貼りつけることにより振動数や減衰比などを測定することができます。

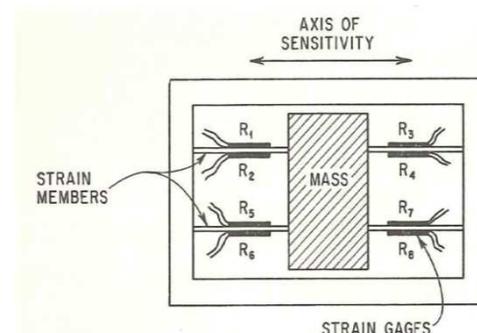


歪ゲージによる振動計測例

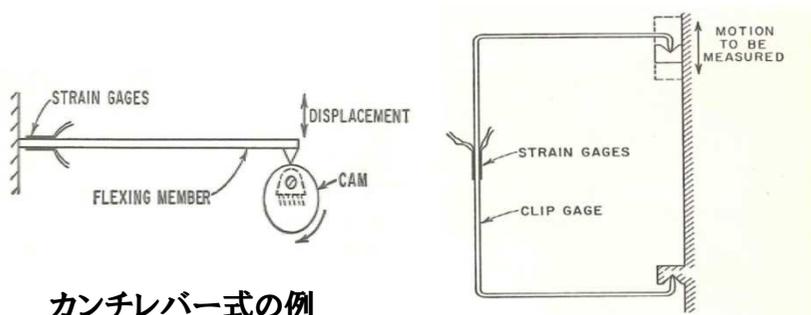
また、歪ゲージの特性を利用し、以下に示すような検出器が市販されていますが、歪測定や検出器の原理を理解すれば、簡単に自作すること出来ます。特に荷重計などは上手く工夫すれば多軸の荷重計を作ることが出来ます。



荷重計の例



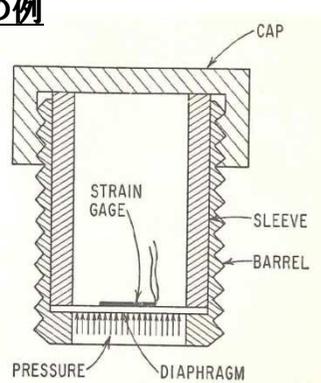
加速度計の例



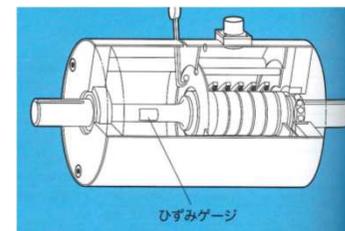
カンチレバー式の例

大変位(クリップゲージ)の例

変位計の例



圧力計の例



トルク計の例