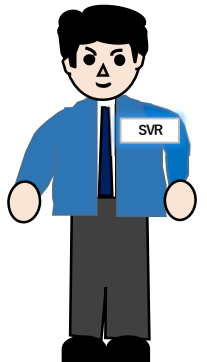


なるほど！（シリーズ6）

衝撃計測について

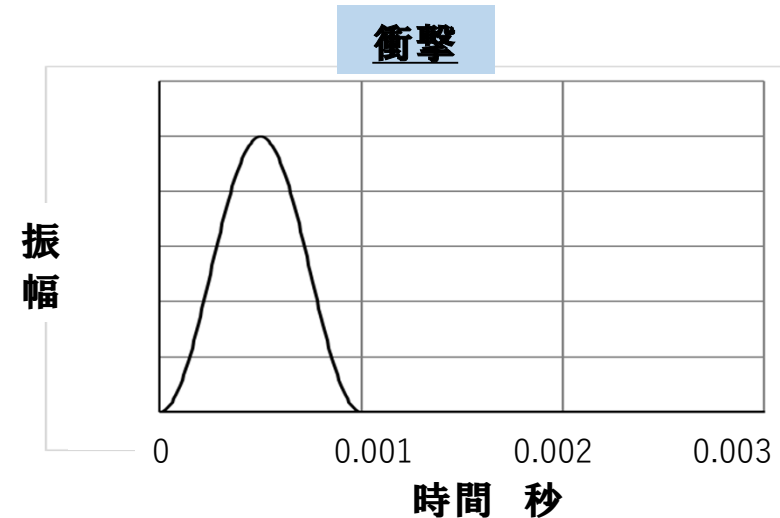
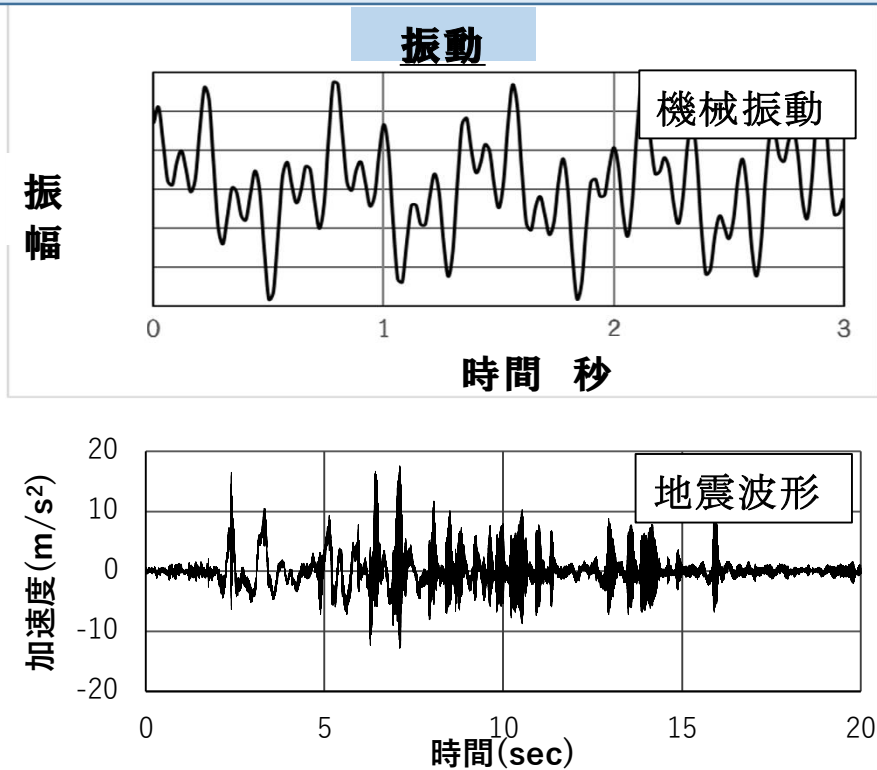
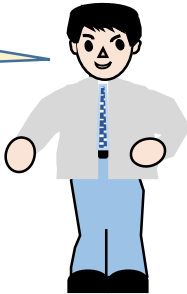
- ・衝撃力（加速度）計測方法
- ・衝突加速度の概略推定方法
（剛球と剛球の衝突：ヘルツの接触理論）

「これだけ知っていれば ほぼ 大丈夫」

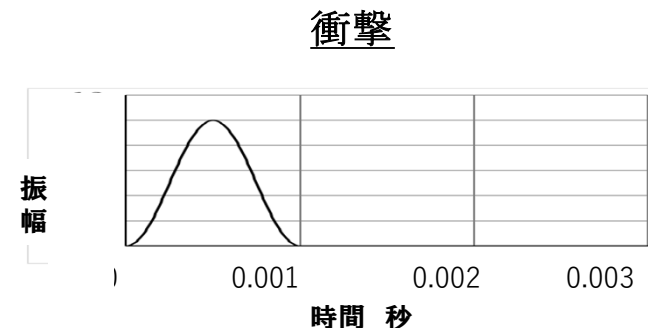
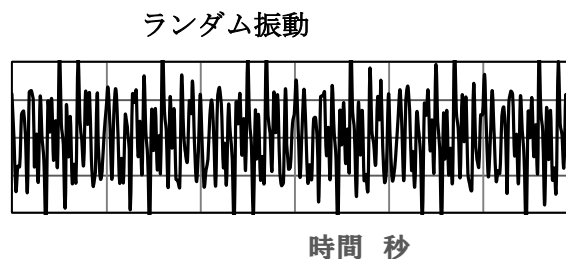
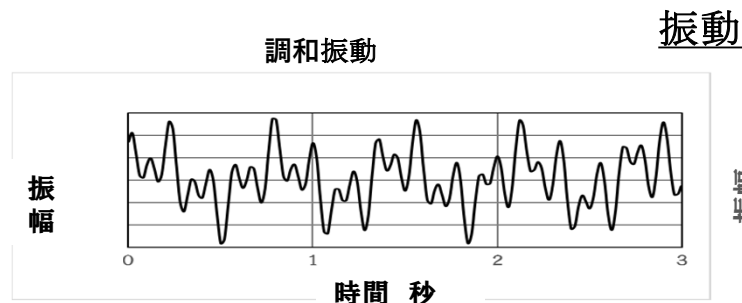


振動と衝撃って何が違うのですか。

下図に示すように振幅などの物理量が時間的に大きくなったり、小さくなったりを**繰り返す事象**が振動で、衝撃は**単発的**な事象です。
それぞれの事象の特徴については次ページを参考にして下さい。

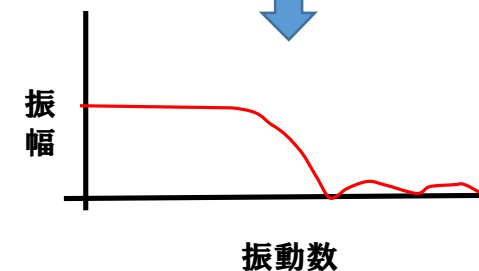
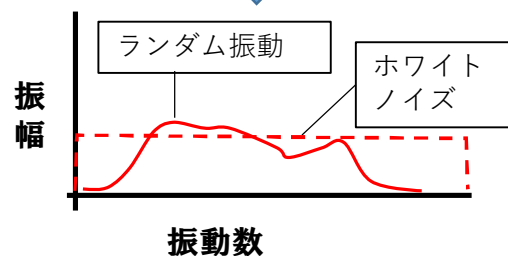
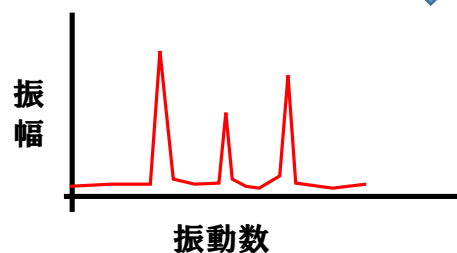


時間領域における振動波形と衝撃波形の違い



振動数領域における スペクトルパターンの違い

FFT分析



特徴比較

- ・時間領域では単一あるいは複数の波が重ね合った波形を示す。
- ・振動数領域で見ると波形に含まれる波の卓越振動数成分がピークとして表示される。

- ・時間領域では単一あるいは複数の波が重ね合った波形であるが、個々の成分の位相や振幅が任意的に変化する波形を示す。
- ・周波数領域では波形に含まれる振動数成分は特に卓越しない。（振幅が平坦な振動はホワイトノイズと言う。）

- ・時間領域ではパルス状の単一的な波形を示す。時間的に繰り返さない。
- ・周波数領域では直流成分から高振動数成分のすべての振動が重ね合っている。
- ・高振動数の上限振動数はパルス幅やパルス形状に依存する。

衝撃と振動の計測方法では違いはあるのでしょうか。

衝撃計測や振動計測では加速度計を使用する場合が多いので、ここでは加速度計測について考えます。この場合、使用する検出器、増幅器、記録器(分析器)はそれぞれ加速度計、チャージアンプ、データロガー(FFT分析器など)になります。

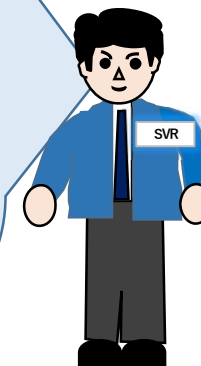
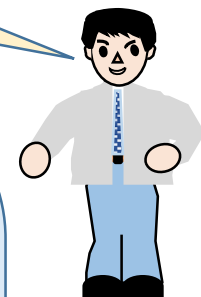
同じ名称・原理の検出器や計測機器ですが、衝撃計測と振動計測では各々の仕様が異なります。その仕様の主な違いは検出器や増幅器などの計測系の**周波数(振動数)特性**と**測定レベル範囲**です。

衝撃と振動の事象の違いは前頁に示した特徴の比較の通りです。

一般的に、**衝撃計測**では振動計測と比較し、測定範囲が**高振動数域**まで、かつ**高加速度レベル**まで計測可能なもの、また、計測可能なダイナミックレンジの広いものを選定します。

その理由は、繰返しになりますが、衝撃事象は短時間(剛球と剛球の衝突では極大まかに数百 μ 秒)の間に物体間のエネルギーの受け渡しが完了するので、その結果、高振動数で高レベルの加速度が発生するためです。

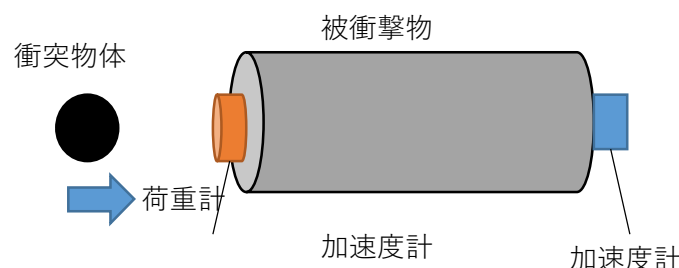
衝突する物体間にゴムなどの緩衝材などが存在すると衝撃作用時間が長くなり、加速度レベルは低下します。従って衝突物体の質量、弾性率、サイズなどに応じて適切な計測機器を選定することが大切です。また、次に述べるフィルターリング方法や加速度計の取り付け方法などに対する注意も必要です。



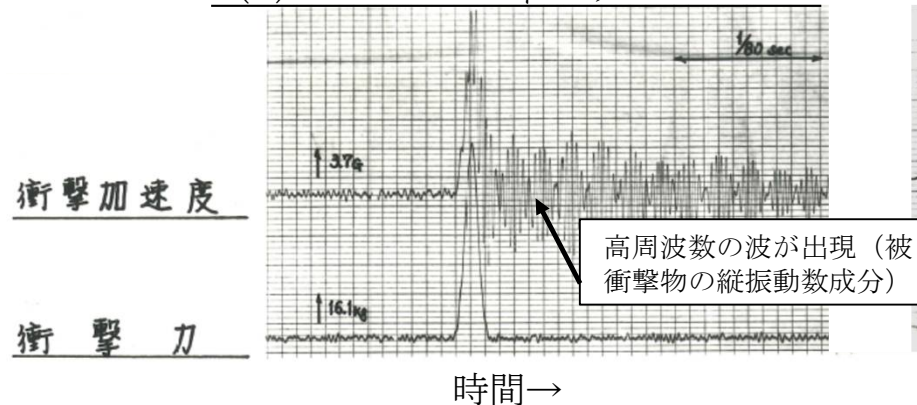
衝撃力と衝撃加速度の計測例を下図に示しますが、これらの計測時には適切なフィルター処理を行うことが多々あります。

下図 (a) ~ (c) はローパスフィルタ処理によるカットオフ周波数と処理後の波形例を示します。同図からわかるように、フィルタ処理の仕方によって得られる波形が異なってくるので、カットオフ周波数の選定には注意が必要です。

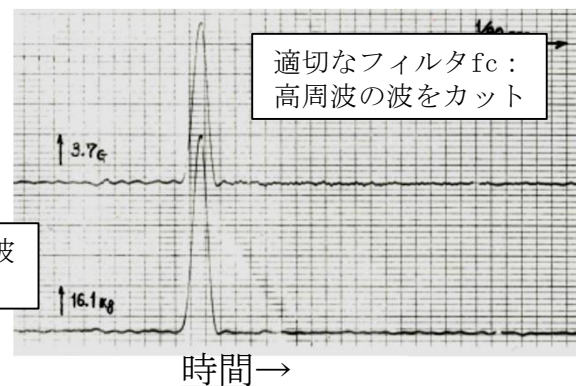
次ページに衝撃計測において必要な計測系の周波数特性範囲例を示していますので、参考にして下さい。



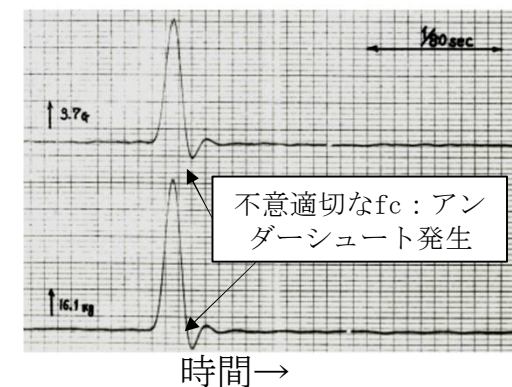
(a) ローパスフィルタ $f_c=3200\text{Hz}$



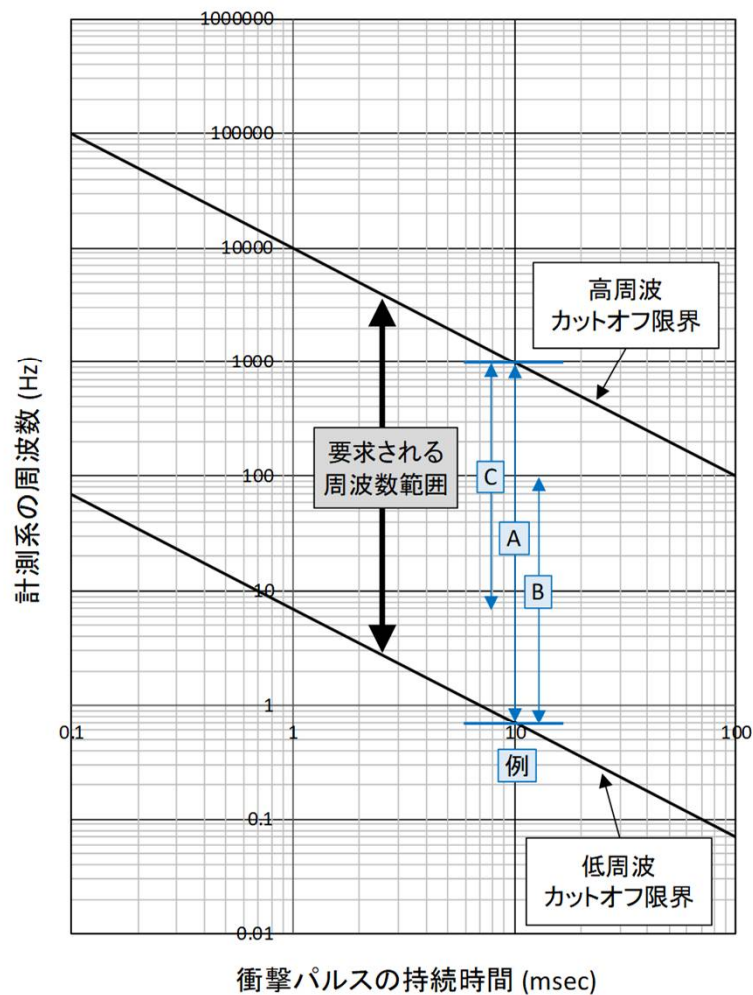
(b) ローパスフィルタ $f_c=800\text{Hz}$



(c) ローパスフィルタ $f_c=400\text{Hz}$

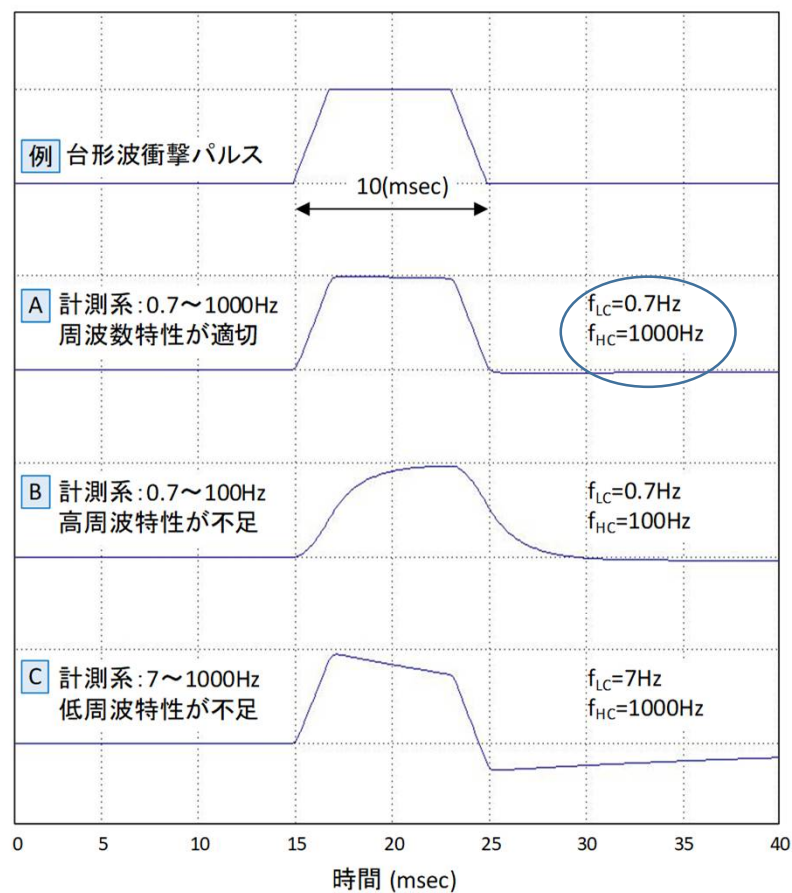


衝撃を計測する場合、計測系に要求される周波数特性は大まかには下図の様になります。



(例) 衝撃パルス持続時間10msecの波形

f_{LC} : 低周波カットオフ周波数 f_{HC} : 高周波カットオフ周波数

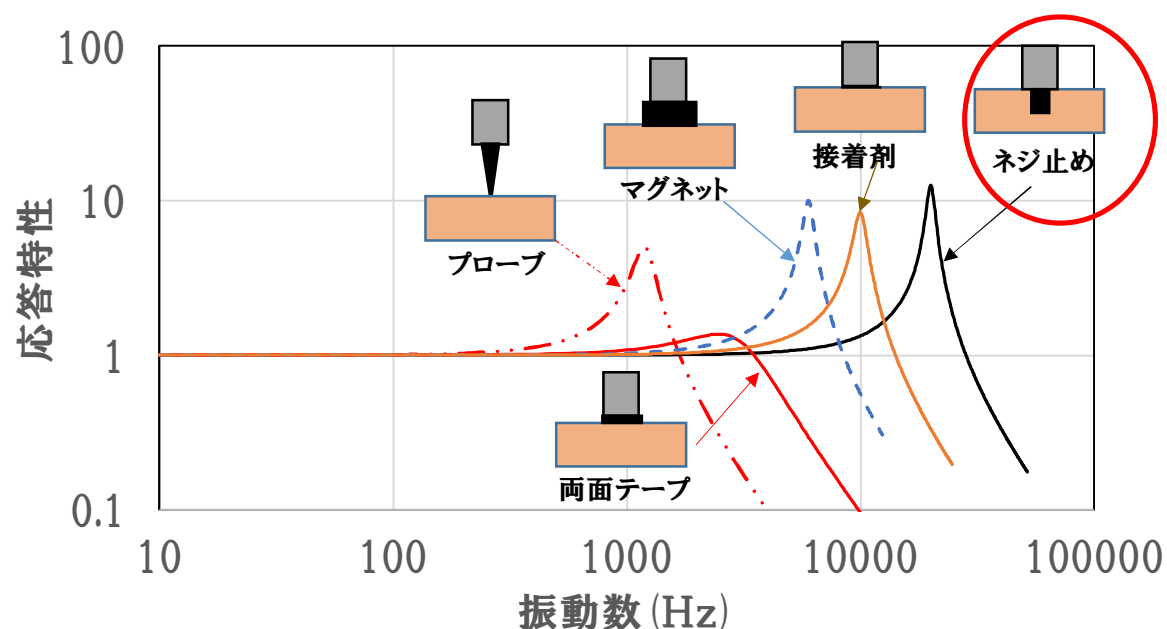


衝撃パルスの持続時間と要求される計測系の周波数範囲の関係

検出器(加速度計)の取付方法にも注意が必要です。これらについては「なるほどシリーズ 3！振動の測定と分析法」でも紹介しましたが加速度計の取り付け方法による周波数特性は下図のようになります。

衝撃計測では基本的に加速度計はネジ止めすることをお勧めします。

なお、加速度計取付け面の粗度状態が周波数特性に大いに影響します。取付面は滑らかな状態が好ましく、グリースなどを接触面に塗ることを推奨します。



衝撃により加速度計には非常に大きな加速度が作用します。従って、加速度計に作用する力(慣性力=加速度計質量×加速度)も大きくなります。その力に対し、加速度計が外れないことが必要です。

マグネットや接着剤では慣性力>接着力となり、加速度計が外れることがあります。

加速度計は小さい質量の方が慣性力は小さくなり、固有振動数が高くなります。その反面、検出感度が低下します。

衝撃計測における注意点のまとめ

注意項目		備考
(1)周波数特性	予想される衝撃パルスに対し、6ページに示す周波数特性を有する計測系を構築する(センサ、アンプ、収録器)	歪ゲージ式加速度計は直流成分から計測可能です。圧電式加速度計は直流成分は計測不可能ですが、高振動数成分の振動計測範囲は歪ゲージ型のものより優れているのが一般的です。
(2)センサの固有振動数	センサ固有振動数の逆数である固有周期 T と衝撃パルス幅 τ の関係は $\tau/T \geq 4$ を目安とする。ダンピング機構がないセンサを使用する場合(圧電式など)はセンサの固有振動数が出現する。	歪ゲージ型加速度計はダンピング機構が付加されているものがある。圧電型加速度計は基本的にはダンピング機能はない。
(2)測定レンジ	ダイナミックレンジの大きい計測機器を選定する。	歪ゲージ型加速度計に比べ圧電型加速度計はダイナミックレンジが広い
(3)センサの耐加速度性能	予想されるパルスの加速度レベルに対し、センサの耐加速度性能としては少なくとも2倍を見込む。	
(4)センサの取付方法	ネジ止めが望ましい。	
(5)リード線固定方法	リード線が衝撃を受け、変形や振動を生じるとノイズが発生することがあります。センサホルダ(ハウジング)出口付近のリード線はしっかりと固定する。特に圧電型センサの場合は注意しましょう。	
(6)データ収録	衝撃計測では時刻暦波形の絶対値を計測したいことが多いため、可能な限り高速のサンプリングを行うことが望ましい。	

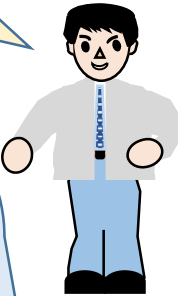
衝撃加速度の計測を行う際、加速度計の選定に当り、衝撃の持続時間や加速度がどの程度なのか予測することが必要になると思いますが、どのように推定すればよろしいでしょうか。

衝撃でどれ位の加速度が発生するかについては、非常に難しい問題です。

衝突物体の質量、材質(弾性率、ポアソン比)、接触面の形状(球状か否か、球状の場合、半径など)、局部塑性変形の有無などが影響すると考えられるからです。

有限要素法などで衝撃事象をシミュレーションし、推定することは可能ですが、私はシミュレーションに関しては門外漢なので専門家に任せたいと思います。

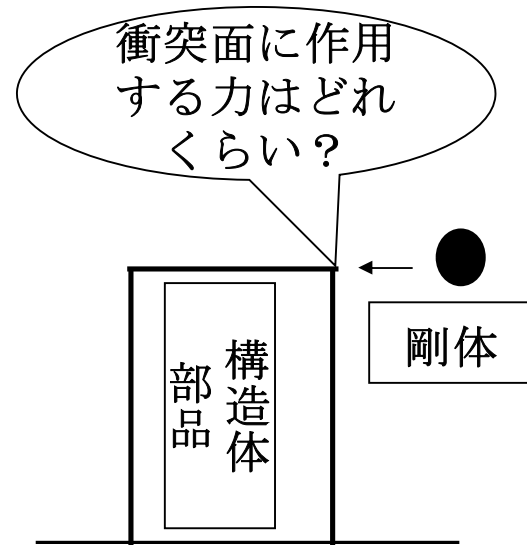
ここでは概略の加速度や接触時間が推定可能と考えられるヘルツ理論による剛球2物体間の衝突時に生じる加速度推定式を示します。実際の物体間の衝突では接触面が球状ではないことが多く、ヘルツ理論どおりには行きませんが、等価半径、等価質量などを適切に考えれば衝突時に発生する加速度の極大まかなオーダー推定は可能だと考えています。



ヘルツ理論による剛球2物体間の衝突時に生じる加速度推定式を示します。

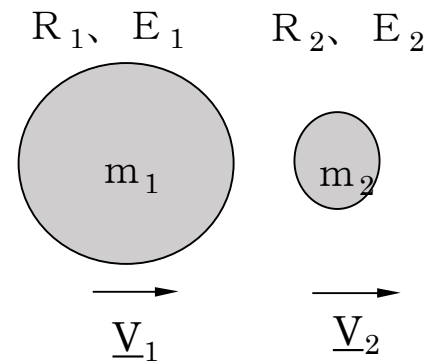
衝撃力の推定（剛球の衝突： 剛球に対するヘルツ理論）

物体の衝突時に発生する衝撃力の推定方法を下図のような弾性球の衝突に置換える。
（モデル化にはノウハウが必要ではある）



・ 構造体や部品に物体が衝突

→
モデル化



弾性球の衝突

衝突モデル化

・2物体の衝突に対する衝撃力(加速度)を検討する:

接触時間の計算

$$t_0 = 2.804 \alpha_1 / \underline{V}$$

ヘルツ理論では $t_0 = 2.94 \alpha_1 / \underline{V}$ であるが、自由表面の波の反射を考慮した場合の2.804を用いた方が良い近似を与える)

ただし、

$$\alpha_1 = \left[\{5 * \underline{V}^2\} / \{4 * n * n_1\} \right]^{2/5}$$

$$n = \left[\{16 * R_1 * R_2\} / \{9 * \pi^2 * (k_1 + k_2)^2 * (R_1 + R_2)\} \right]^{1/2}$$

$$n_1 = (m_1 + m_2) / (m_1 * m_2)$$

$$k_1 = (1 - \nu_1^2) / (\pi * E_1)$$

$$k_2 = (1 - \nu_2^2) / (\pi * E_2)$$

ν : ポアソン比

$\underline{V}$: 衝突速度 : $\underline{V}_2 - \underline{V}_1$

衝撃力の計算式

$$\text{衝撃力 } F_0 = (S_c * \underline{V} * (1 + e) * (m_1 * m_2) / (m_1 + m_2)) / t_0$$

$$m_1 \text{ の加速度 } ACC_1 = (S_c * \underline{V} * (1 + e) * (m_2) / (m_1 + m_2)) / t_0$$

ただし、

S_c は衝撃加速度のパルス形状による係数。

正弦パルスの場合 $S_c = 1.571$ 、正矢パルスの場合 $S_c = 2.0$

参考：衝撃力パルスの形状

正矢パルス形状とは、

$$F(t) = (F_0/2) * (1 - \cos(2\pi t/\tau)) \quad [0 < t < \tau]$$

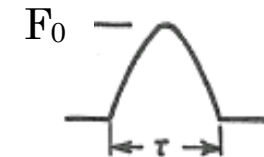
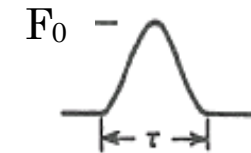
$$F(t) = 0 \quad [\tau < t]$$

正弦パルス形状とは

$$F(t) = F_0 * \sin(\pi t/\tau) \quad [0 < t < \tau]$$

$$F(t) = 0 \quad [\tau < t]$$

で定義される。



次ページに示す剛球の衝突実験では正矢パルス形状とした方が実験値と一致していることがわかります。

実験値と計算値の加速度値の比較結果

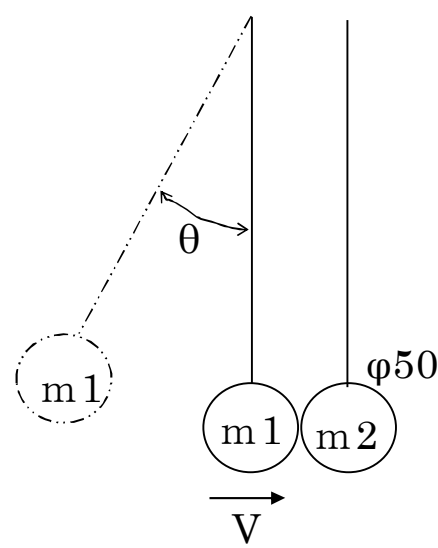
実験条件：下図に示す $\Phi 50\text{mm}$ の剛球同士の衝突に対する加速度の計測値とヘルツ理論に基づく計算値の比較結果比較。

- ・ 計算では球同士の反発係数 $e = 0.8$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、
- ・ 衝撃力のパルス形状は正矢パルス、あるいは正弦波パルス。

結果

正矢パルスの計算結果は計測結果と良く一致する。

正弦波パルスの結果は計測結果よりも低くなる。



球と球の衝突

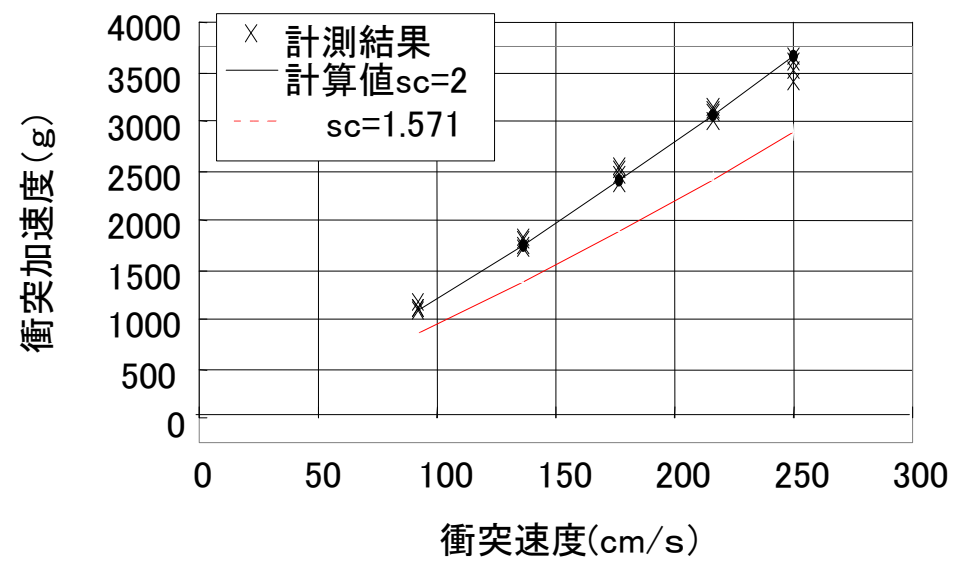


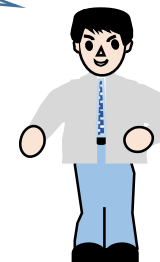
図 計測結果と計算結果の比較

おまけ①: 知っておくと便利です。衝撃応答スペクトルについて

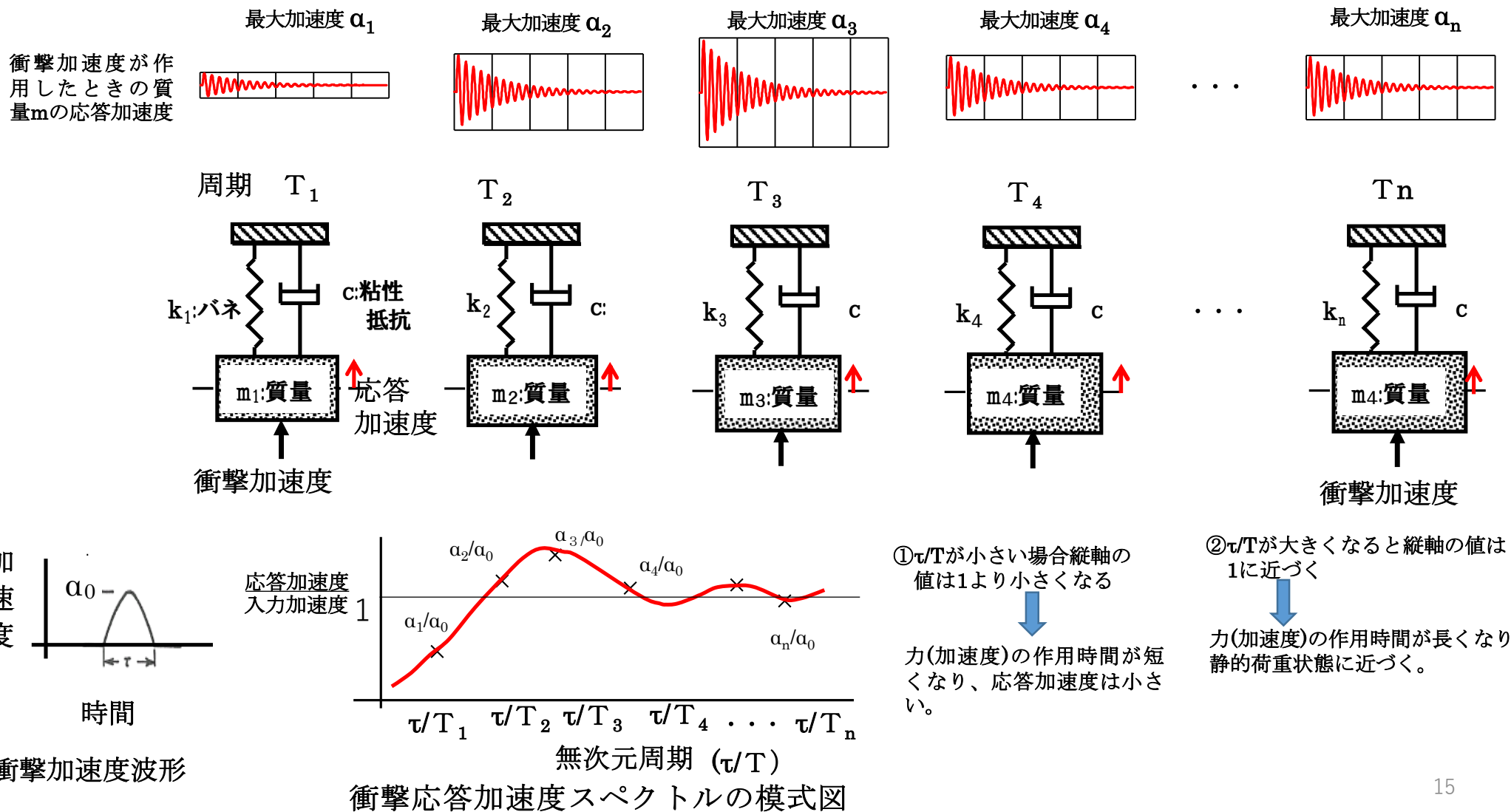
そもそも衝撃応答スペクトルとは何ですか？

衝撃応答スペクトルとは次ページの図に示すような一自由度振動系の質量に衝撃力が作用した時の質量の応答に関し、一自由度振動系の固有周期 (T) と衝撃力の作用時間 (τ) との比率を横軸に、縦軸に質量の応答量 (変位、速度、加速度) の最大値を採って図示したものです。

注) 衝撃スペクトルは衝撃波形を周波数分析したものではありません。

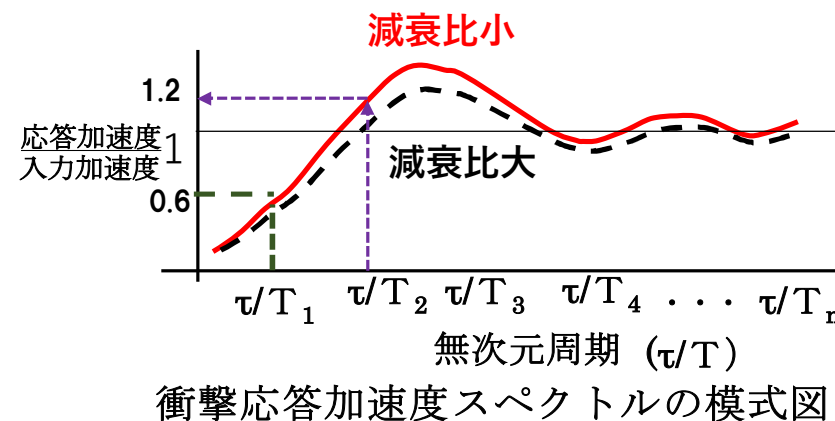
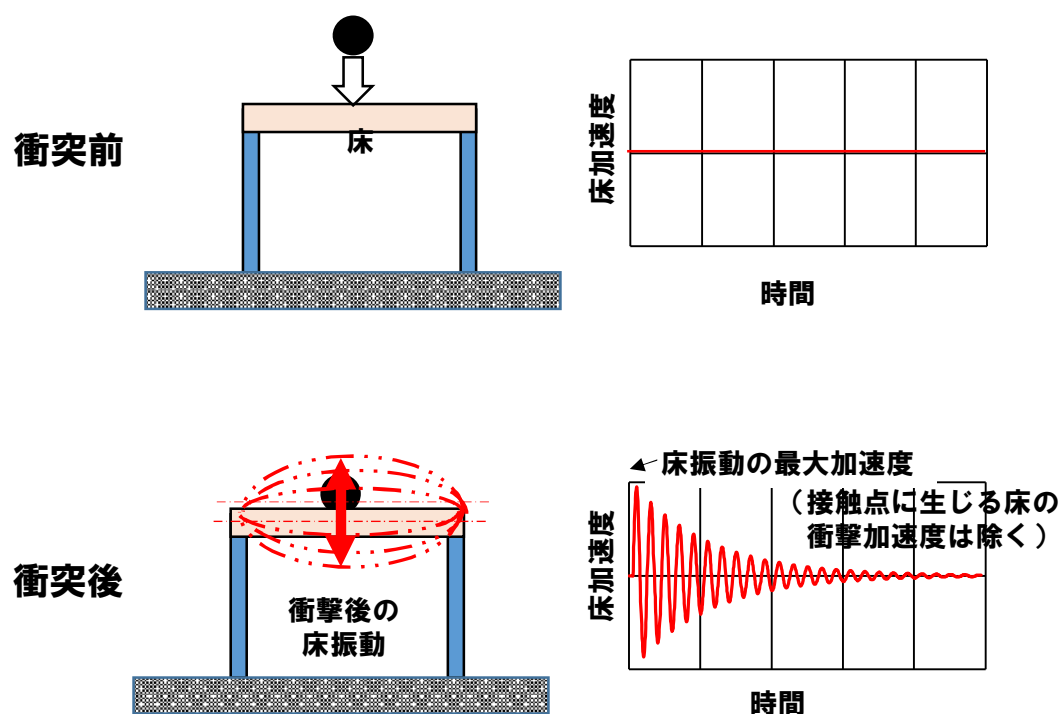


衝撃加速度応答スペクトル



衝撃応答スペクトル図の使い方

例題：建物の床に錘を落下させた際、生じた衝撃加速度は α_0 、作用時間 τ であった。
床の固有周期が T_2 である場合に床に生じる振動加速度の最大値を求める。



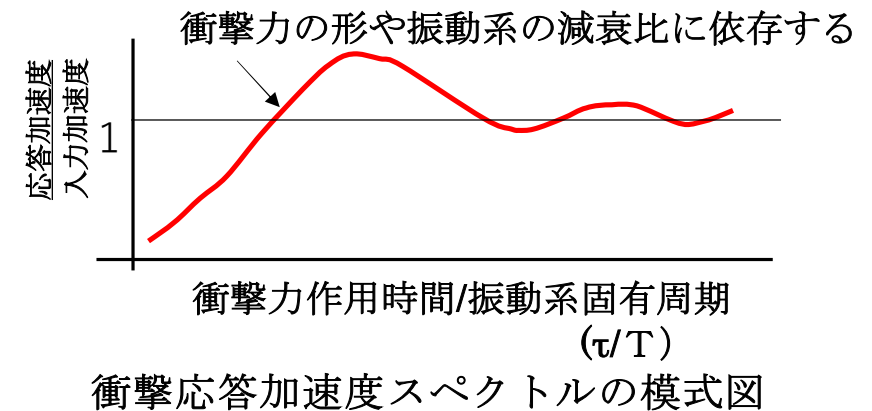
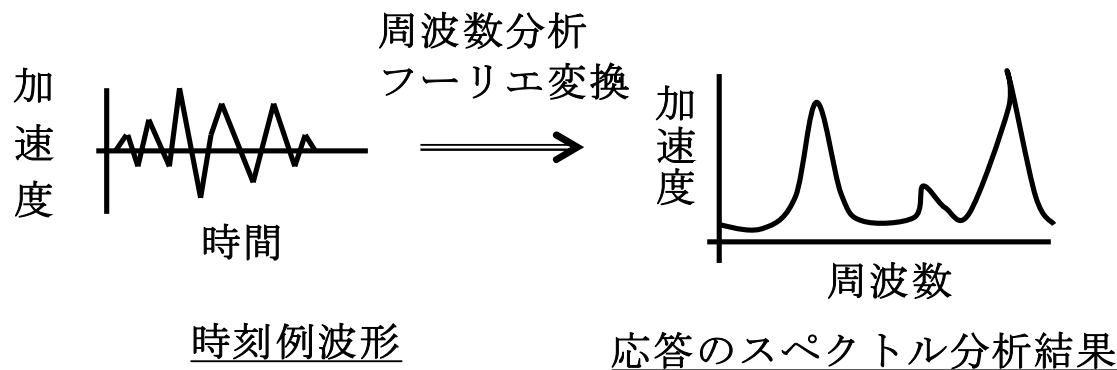
固有周期 T_2 成分の床の振動加速度レベルは衝撃加速度 α_0 の1.2倍である。
ちなみに固有周期が T_1 の場合、周期 T_1 成分の床振動加速度は 入力加速度の0.6倍になる。

結論：作用時間 τ 、衝撃加速度レベル α_0 の衝撃が固有周期 T_i の一自由系振動系に作用した場合、その系の振動応答量をチャート上から容易に求めることができる。

衝撃応答スペクトルと振動応答のスペクトル分析は意味が異なります。

- 振動応答のスペクトル分析は変位や加速度の時刻歴波形を周波数分析した結果のスペクトルのことです。

従って、スペクトル分析結果は周波数分析前の時刻歴波形にどのような周波数がどれ位の大きさ含まれているのかを知りたい場合に有効です。



- 応答スペクトルは前述の図で説明したように一自由度振動系に外力が作用したときの最大値に着目し、振動系の固有振動数と減衰比を変化させ、そのときの応答の最大値を求めその結果を、固有振動数(固有周期)を変数にし、減衰比をパラメータとして図示した曲線のことです。

従って、応答スペクトルは作用した衝撃力に対し、衝撃力を受ける振動系の振動レベルが大きく(あるいは小さく)なる固有振動数を知りたい場合や、衝撃力による振動系の最大応答量を知りたい場合に有効です。