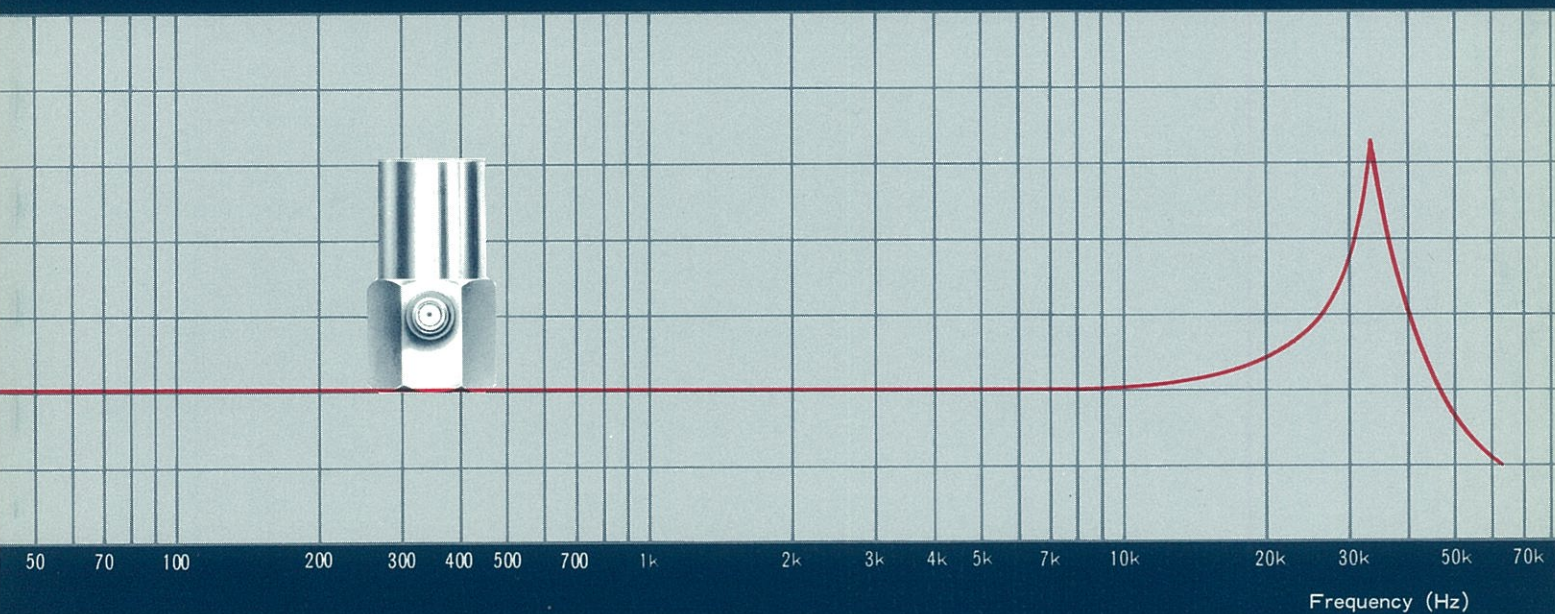


圧電型

# 加速度センサ

テクニカル・ハンドブック



Frequency (Hz)

# 目

# 次

本書の中で使われている記号と意味	2
1. 概 要	3
2. 圧電型加速度ピックアップ	
(2-1) 特 長	4
(2-2) 圧電効果	4
(2-3) 原 理	6
3. 感 度	
(3-1) 電荷感度	9
(3-2) 電圧感度	10
(3-3) 感度の表示法	10
(3-4) クロストーク	11
4. 周波数特性	
(4-1) 固有共振周波数	13
(4-2) 電荷増幅における低域遮断周波数	14
(4-3) 電圧増幅における低域遮断周波数	15
(4-4) 接触共振周波数と高域特性	15
(4-5) 感度と共振周波数	18
5. 位相特性	20
6. ダイナミックレンジと直線性	22
7. 過渡応答	
(7-1) ゼロシフト	23
(7-2) リンギング	25
8. 環境条件	
(8-1) 使用温度範囲	27
(8-2) 温度特性	27
(8-3) 温度トランジェントによるノイズ	28
(8-4) 湿度の影響	29
(8-5) 音響感度	29
(8-6) 電磁場の影響	29
9. 感度校正	
(9-1) 絶対校正	31
(9-2) 比較法	31
10. 加速度ピックアップの適正な使い方	
(10-1) 加速度ピックアップの構造と用途	33
(10-2) 取り付け方	34
(10-3) ローノイズケーブル	36
(10-4) 低周波低レベル振動計測	36
(10-5) 衝撃及び過渡振動の計測	37
(10-6) 振動体が軽い場合	38
(10-7) グランドループ	39

○本書の中で使われている記号と意味

(アルファベット順)

記号	意 味	記号	意 味
$A$	オペアンプのオープンループゲイン	$m_b$	ピックアップベースの質量
$a$	ピックアップおもりの加速度	$P_s$	圧電体の自発分極
$a_0$	ピックアップベースが受ける加速度	$Q$	電 荷
$C$	静電容量	$Qm$	共振の鋭さ
$C_f$	チャージアンプのフィードバック容量	$q_d$	圧電体の発生する電荷
$C_d$	圧電体の静電容量	$q_r$	$C_f$ に貯えられる電荷
$C_c$	ケーブルの静電容量(外部容量)	$R_f$	チャージアンプの放電抵抗
$C_s$	コンプライアンス	$S$	ひずみ
$D$	電気変位	$S$	バネの断面積
$D$	減衰係数	$S_q$	電荷感度
$D_c$	臨界減衰係数	$S_v$	電圧感度
$d_{ij}$	圧電体の等価圧電定数	$S_{vt}$	横軸感度
$E$	電 界	$T$	応 力
$E$	ヤング率	$T$	パルス幅
$e_0$	開放出力電圧	$Tn$	固有共振周期( $1/f_n$ )
$\epsilon$	誘電率	$Tc$	圧電体のキュリ一点
$\epsilon_0$	真空中の誘電率	$t$	任意の時間
$F$	力	$\Delta t$	ピックアップベースに対する おもり変位の遅れ時間
$F_0$	ピックアップベースが受ける力	$\tau$	時 定 数
$f_0$	自由釣下げにおける不減衰固有共振周波数	$U$	ラプラス変換におけるステップ関数
$f_n$	ベース質量無限大における 不減衰固有共振周波数	$V$	電 圧
$f_d$	減衰固有共振周波数	$W$	ピックアップの重量
$f_c$	低域遮断周波数	$x$	振動波形の片振幅
$f_r$	接触共振周波数	$x_0$	ピックアップベースの変位
$G$	重力加速度比	$y$	ピックアップおもりの変位
$g$	重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ )	$\theta$	} 角 度(ラジアン)
$g_{ij}$	圧電体の電圧出力係数	$\varphi$	
$h$	減衰比( $D/D_c$ )	$\omega$	角周波数 ( $2\pi f$ )
$k$	バネ定数	$\omega_c$	低域遮断角周波数
$l$	バネの長さ	$\phi$	位 相 角
$m$	おもりの質量	$\nu$	振動数比 ( $f/f_n$ )
$m_0$	ピックアップの全質量		

# 1. 概 要

振動を計る場合、空間に一つの基準静止系をもうけて、その点からの変位量を計測する方法と、加速度ピックアップを直接、振動体に取り付けてその加速度から算出する方法があります。振動体の質量が、加速度ピックアップの質量によって影響を受けるほど軽い場合を除いて、一般には、後者の加速度法が用いられています。この方法だと、走行中の車両や飛行機など基準静止系からの変位計測が不可能な場合でも、振動体に取り付けるだけでただちに計測できるという実用上の利点があります。

振動計測用センサを大別すると、表 1.1.1、に示すように接触型と非接触型とに分けられます。

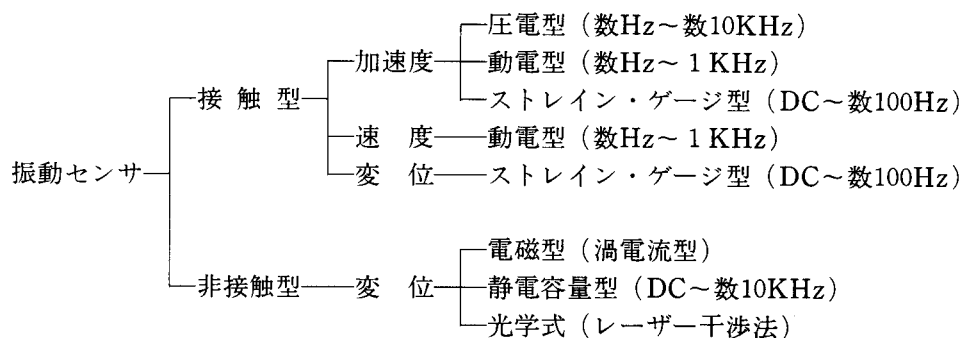


表 1.1.1 振動センサの分類

これらの中でも特に圧電型加速度ピックアップは、広帯域・高感度・小型軽量・広いダイナミックレンジなど優れた特長を多く持っているため、今日、最も普及している方式です。

## 2. 圧電型加速度ピックアップ

### (2-1) 特 長

圧電型加速度ピックアップには、多くの優れた特長があるため、振動計測の各分野で最も多く使われています。圧電型加速度ピックアップは重量の割に広帯域・高感度であることが大きな特長といえます。広帯域のため衝撃計測を始めとして、広い周波数成分を含んだ振動波形も原波形を歪めることなく計測できます。また、感度が高い割に構造的にも機械強度が強いためそのダイナミックレンジはたいへん広がっています。

もう一つの大きな特長は、感振素子の圧電体が電荷応答型でDC成分のピーク値を維持できないために、静的感度を持たないということです。そのため、積分器を通して速度や変位を求める場合でもゼロシフト（P23参照）の誤差を考えなくてもよいという使いやすさがあります。

- 重さの割に高感度である。(他の方式に比べて。)
- 固有共振周波数を高く設計できるので広帯域である。
- 機械強度が強く、高感度のためダイナミックレンジが極めて広い。
- 電荷応答型のため静的感度を持たない。
- 圧電効果を利用しているため外部電源不要。
- 原理上、ダンパーがないため、経時特性に優れている。
- 基準点の設置などのわずらわしさがなく、取り付けて即計測できる。

### (2-2) 圧電効果

固体物質を構成する原子やイオンが三次元的に規則正しく配列したものを結晶といいます。結晶は、その原子やイオンの対称性によって32種類の晶族に分類されます。そのうちの20晶族に属する結晶は圧電性のあることが知られています。

水晶やロッシェル塩、或はチタン酸ジルコン酸鉛磁器〔 $\text{Pb}(\text{Zr} \cdot \text{Ti})\text{O}_3$ 〕など20晶族に属するこれらの結晶は、圧力、張力、せん断力を受けてひずみを生ずると結晶に誘電分極を発生し電界を生じます(正効果)。逆に結晶に電界を加え分極を起こさせると結晶はひずみを発生し応力を生じます(逆効果)。この現象を圧電効果といい、圧電性を示す結晶を圧電体と呼びます。

圧電体では、応力  $T$  およびひずみ  $S$  (機械的量) と電界  $E$  および電気変位  $D$  (電氣的量) とが圧電効果を介して互いに結び合っています。この性質を電気機械結合といい、現在、加速度ピックアップを始めとして、各方面で大いに利用されています。

圧電効果は、次に示す圧電方程式で表わすことができます。 $T$  と  $E$  を独立変数に選び、マトリクス表記法を用いて表わすと、

$$d\text{-形式} \begin{cases} S = C_s^{E=0} \cdot T + d \cdot E \\ D = d \cdot T + \epsilon^{T=0} \cdot E \end{cases} \quad (2.2.1)$$

となります。また  $T$  と  $D$  を独立変数に選べば

$$g\text{-形式} \begin{cases} S = C_s^{D=0} \cdot T + g \cdot D \\ E = -g \cdot T + 1/\epsilon^{T=0} \cdot D \end{cases} \quad (2.2.2)$$

と表わすことができます。(但し  $\epsilon$  : 誘電率、 $C_s$  : コンプライアンス) また、上式中の  $d$  および  $g$  はそれぞれ  $d$  定数 (等価圧電定数)、 $g$  定数 (電圧出力係数) と呼ばれ、次のように定義されます。

$$d = \frac{S - C_s^{E=0} \cdot T}{E} = \frac{\text{(生じた歪)}}{\text{(与えられた電界の強さ)}} \quad \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{D - \epsilon^{T=0} \cdot E}{T} = \frac{\text{(生じた電荷密度)}}{\text{(与えられた応力)}} && \frac{\text{c/m}^2}{\text{N/m}^2} \\
g &= \frac{S - C_s^{D=0} \cdot T}{D} = \frac{\text{(生じた歪)}}{\text{(与えられた電荷密度)}} && \frac{\text{m/m}}{\text{c/m}^2} \\
&= \frac{E - D/\epsilon^{T=0}}{-T} = \frac{\text{(生じた電界の強さ)}}{\text{(与えられた応力)}} && \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}
\end{aligned}$$

したがって、分極処理された多結晶の圧電体では次のように表わすことができます。

$$\left. \begin{aligned}
d &= \frac{S}{E} \text{ (m/V)} && \text{又は} && d = \frac{Q}{F} \text{ (C/N)} \\
g &= \frac{E}{T} \text{ (V-m/N)} && \text{又は} && g = \frac{S}{Q} \text{ (m}^2\text{/c)}
\end{aligned} \right\} \quad (2.2.3)$$

また、両者の間には

$$d = g \cdot \epsilon^{T=0} \quad (2.2.4)$$

の関係があります。この  $d$  定数、 $g$  定数は 3 階のテンソル量<sup>(1)</sup>であるため、18 種類の方向を持ちます。それらを大きく分けると次の 4 種類に分類することができます。つまり、(i) 電界軸に直角方向の伸縮、(ii) 電界軸に平行の伸縮、(iii) 電界軸に直角な面内のズレ、(iv) 電界軸に平行な面内のズレ、です。

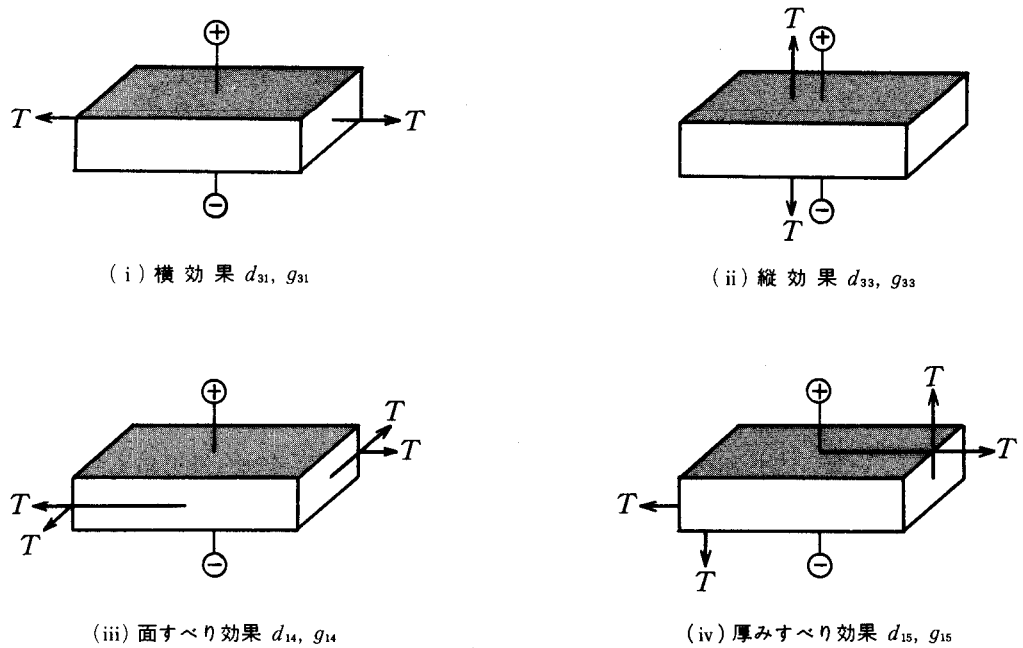


図 2.2.1 圧電効果

図 2.2.1 の (i) を横効果  $d_{31}$ 、 $g_{31}$ 、(ii) を縦効果  $d_{33}$ 、 $g_{33}$ 、(iii) (iv) をせん断効果  $d_{15}$ 、 $g_{15}$  と呼びます。

注(1)  $d$  定数、 $g$  定数は、テンソルの略記法を用いて表示しているため、2 階のテンソル量ではなく実際は 3 階のテンソル量です。つまり正式には、 $d_{31}$ 、 $d_{33}$ 、 $d_{15}$  はそれぞれ  $d_{311}$ 、 $d_{333}$ 、 $d_{113}$  を意味しています。但し、このとき分極方向はすべて「3」方向としています。第 1 項は、外部電界の方向、第 2 項は、この方向に垂直な面を表わし第 3 項が表わす方向の応力を受けます。第 3 項は応力の方向を表わします。

## (2-3) 原 理

圧電型加速度ピックアップは、圧電効果を利用したのですが、用途に応じて、前述した各効果を使い分けています。

構造上、機械的強度が強いため、衝撃計測を始めとし、あらゆる計測に使用できる圧縮型（縦効果）、温度トランジェントや温度変化によるパイロ電気<sup>(1)</sup>の影響を受けにくいシェア型（厚みすべり効果）、低域周波数で比較的高感度に設計できるベンディング型（横効果）があります。構造は図2、3、1 (a)(b)(c)に示すようになっていますが、圧電体に加わる応力の方向が異なるだけで、基本的な原理はみな同じです。

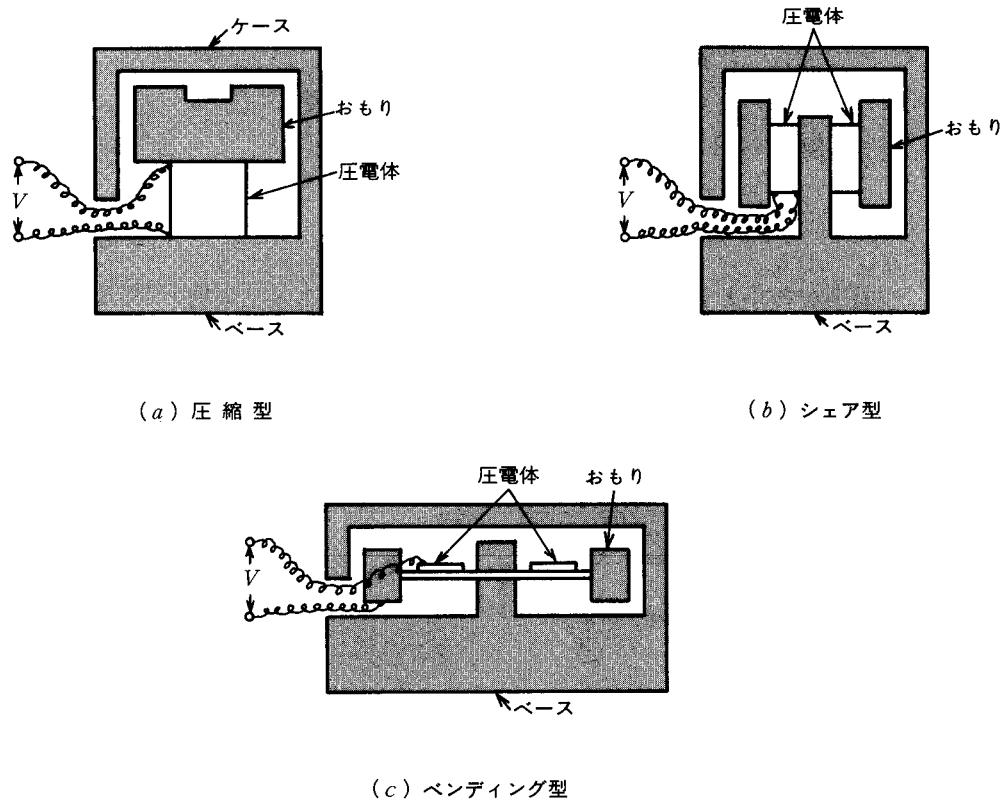


図 2.3.1 圧電型加速度ピックアップの構造

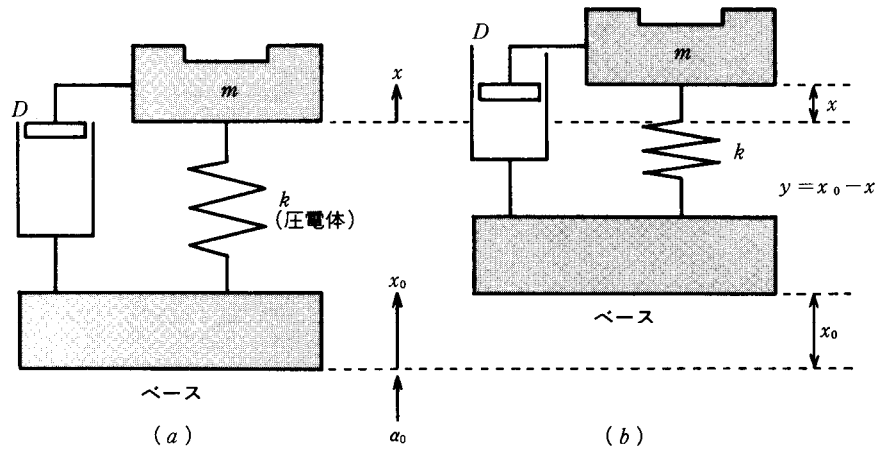
いま、この加速度ピックアップの運動方向が上下方向だけである場合について述べます。図2、3、2 (a)(b)で、 $k$ は圧電体のバネ定数に相当し、 $D$ は空気抵抗やその他もろもろの減衰を表わしています。同図(a)においてベースに変位 $x_0$ の上向きの加速度 $a_0$ が与えられたとき、バネ $k$ は図(b)のように変位 $y$ だけ圧縮されます。このとき、おもり $m$ に加わる力 $F$ は、次式のように表わされます。

$$F = F_0 - k \cdot y - D \cdot y' \quad (2.3.1)$$

$F_0$ ：ピックアップに与えられた力

$y'$ ：おもりの速度

注(1) 圧電体の結晶は、電界も応力も加わらない状態でもはじめから分極しています。これを自発分極と呼び通常 $P_s$ で表わします。 $P_s$ を持つ結晶は、温度により熱振動状態が変わったり、熱膨張により結晶の大きさが変化します。したがって $P_s$ は温度の関数であり、結晶の温度変化分が $P_s$ の変化分となって結晶の表面に表われ電位差を生じ（正効果）逆に電界を加えると、それを打ち消すような温度変化を生じます（逆効果）。これをパイロ電気と呼びます。（P28参照）



$m$  : おもり     $D$  : 減衰     $k$  : バネ定数(圧電体)  
 $x_0$  : ベースの変位     $x$  : おもりの変位  
 $\alpha_0$  : 加速度     $y$  : 圧電体が受ける圧縮変位量 ( $y = x_0 - x$ )

図 2.3.2 圧電型加速度ピックアップの原理

ここで、ニュートンの第二法則〔力  $F = \text{質量 } m \times \text{加速度 } a$ 〕から式 2、3、1 は、次式のようにになります。

$$F = m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = m \cdot y'' = F_0 - k \cdot y - D \cdot y'$$

$$\begin{aligned}
 F_0 = m_0 \cdot \alpha_0 &= m \cdot y'' + D \cdot y' + k \cdot y \\
 &= m \cdot a + D \cdot v + k \cdot y
 \end{aligned}
 \tag{2.3.2}$$

$m_0$  : 加速度ピックアップの全質量  
 $\alpha_0$  : 加速度ピックアップに与えられた加速度  
 $a$  : おもりに与えられた加速度 ( $y''$ )  
 $v$  : おもりのベースに対する速度 ( $y'$ )

したがって、バネ質量系（おもり・圧電体・ベース）の固有共振周波数よりも十分に低い周波数においては、式 2、3、2 から、加速度ピックアップに与えられた加速度  $\alpha_0$  と圧電体に加わる慣性力  $F = m \cdot a$  は直接比例し、また、周波数に対しては無関係となります。

そして、この慣性力  $F$  は、圧縮型の場合、圧電体に縦方向の歪を与えることとなりますが、そのときに発生する電荷  $Q$  は、式 2、2、3 より次式のようにになります。



$$d_{33} = \frac{Q}{F_0} = \frac{Q}{m \cdot a_0}$$

$$Q = F_0 \cdot d_{33} = m \cdot a_0 \cdot d_{33} \quad (2.3.3)$$

このとき、 $d_{33}$ 、 $m$ は一定ですから、加速度 $a_0$ に対して $Q$ は一次的に比例します。次に圧電体の静電容量 $C$ によって電荷 $Q$ は電圧 $V$ に変換されます。

$Q = CV$ より式2、3、3は次のように表わすことができます。

$$Q = CV = F_0 \cdot d_{33} = m \cdot a_0 \cdot d_{33}$$

$$V = \frac{F_0 \cdot d_{33}}{C} = \frac{m \cdot a_0 \cdot d_{33}}{C} \quad (2.3.4)$$

この場合も、静電容量 $C$ は一定と考えられますので $a_0$ は $V$ に一次比例します。

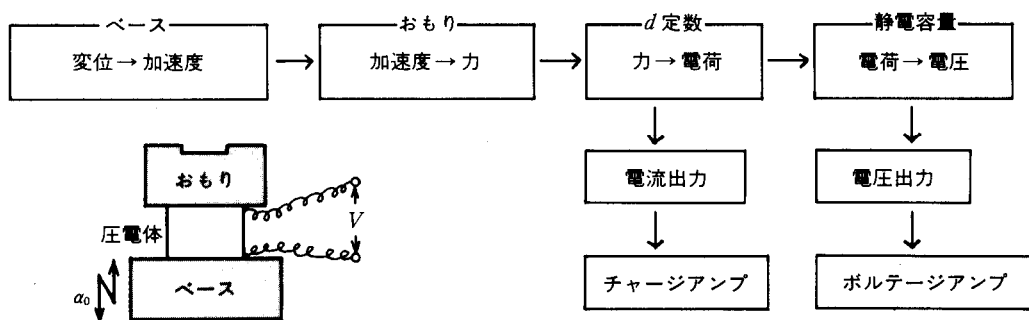


図 2.3.3 圧電型加速度ピックアップブロックダイアグラム

以上のように、圧電型加速度ピックアップは、ベースに受けた加速度を最終的に電圧として出力します。電荷及び電圧出力は共に加速度に一次比例しますから、それらを計測することにより、そのときの加速度を知ることができるわけです。一般に電荷出力を電荷感度、電圧出力を電圧感度と呼びます。

### 3. 感 度

#### (3-1) 電荷感度

圧電体に力が加わると電荷がチャージされます。その電荷量そのもので表示された値を電荷感度といいます。この電荷感度は式2、3、3からもわかるように、容量性負荷の影響を受けないためケーブルの長さが変わっても感度は変化しません。電荷感度で振動を計測する場合は、チャージアンプを使用します。このチャージアンプは一種の積分器と考えることができ電荷を電圧に変換します。

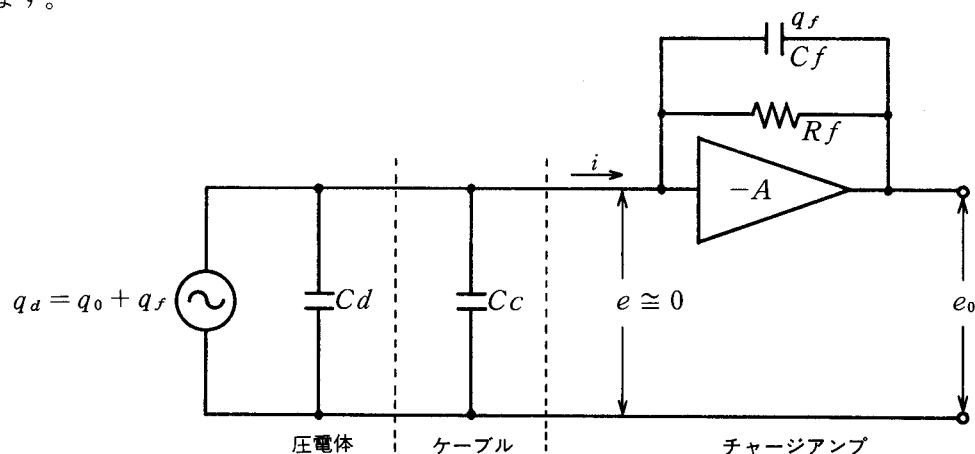


図 3.1.1 電荷増幅の等価回路

図3、1、1で $-A$ はオペアンプの増幅度（マイナス符号は入出力間で逆位相になることを示す。） $C_d$ は圧電体の静電容量、 $C_c$ はケーブル容量、 $C_f$ はフィードバック容量、 $R_f$ はフィードバック抵抗、 $q_a$ は圧電体が発生する電荷、 $q_f$ は $C_f$ に貯えられる電荷、 $q_0$ は $C_d$ および $C_c$ に貯えられる電荷を表わします。

いま、圧電体に電荷 $q_a$ が発生したとします。この電荷 $q_a$ は電流 $i$ によって移動しますが、その際、オペアンプの入力インピーダンスはほぼ無限大のため、入力電流のすべてはフィードバック回路に流れ込むことになります。従って、圧電体で発生した電荷 $q_a$ は、入力容量 $C_d + C_c$ および $C_f$ にすべてチャージされます。すなわち、発生電荷 $q_a$ は、 $q_0 + q_f$ と等しいことになります。図3、1、1の回路図では、次の関係が成立します。

$$e_0 = -Ae \quad e = \frac{q_0}{C_d + C_c} \quad e - e_0 = \frac{q_f}{C_f}$$

$$q_0 = -q_f \frac{C_d + C_c}{C_f} \cdot \frac{1}{1 + A} \tag{3.1.1}$$

$$e = -\frac{q_f}{C_f} \cdot \frac{1}{1 + A} \tag{3.1.2}$$

$$e_0 = -\frac{q_f}{C_f} \cdot \frac{A}{1 + A} \tag{3.1.3}$$

ここで、オペアンプのオープンループゲイン $A$ は、 $A \gg 1$ ですから

$$\begin{aligned} q_0 &\doteq 0 \\ e &\doteq 0 \\ e_0 &\doteq -\frac{q_f}{C_f} \end{aligned} \tag{3.1.4}$$

と近似することができます。上式から明らかなようにチャージアンプでは、入力電圧 $e$ は常にほぼ0に保たれ、 $q_0 \doteq 0$ であることから $q_a \doteq q_f$ となり、ピックアップに発生した電荷はすべてフィードバック容量 $C_f$ にチャージされることになります。式3、1、4はチャージアンプの変換率を表わ

します。これより、感度は、入力容量 ( $Cd + Cc$ ) には影響されず、フィードバック容量のみに関係することがわかります。

### (3-2) 電圧感度

電圧出力によって振動を計測する場合、電圧増幅器（以下、ボルテージアンプと呼ぶ）を使用しますが、そのときの等価回路は、図3.2.1のようになります。

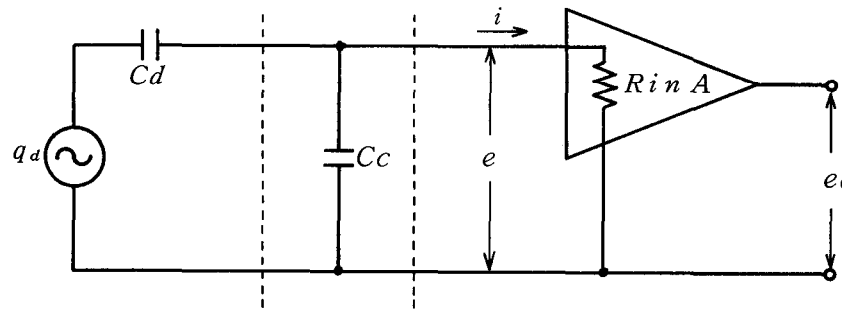


図 3.2.1 電圧増幅の等価回路

図中  $R_{in}$  は電圧増幅器の入力抵抗、 $C_d$  はピックアップ本体の静電容量、 $C_c$  はケーブル容量、 $q_d$  はピックアップに発生した電荷を表わします。このピックアップに発生した電荷  $q_d$  は、電流  $i$  により、入力抵抗  $R_{in}$  を通して放電されます。このときボルテージアンプの入力電圧  $e$  は、式2.2.3及び式2.3.4より次のようになります。

$$e = \frac{q_d}{Cd + Cc} \quad (3.2.1)$$

式3.2.1が示す通り、電圧感度は容量性負荷の影響を受け、ケーブルが長くなるにしたがって感度は低下します。よって、この方法ではケーブルを長く延ばす計測には適しません。もしケーブルを長く延ばす必要がある場合は、ボルテージアンプをボルテージ・フォロワー（インピーダンス変換器）とし、その低出力インピーダンス側で長く延ばすようにするとよいでしょう。その場合  $Cd - R_{in}$  間はあるべく短かく結線すると感度の低下やノイズの混入が少なくなり有利です。

ボルテージ・フォロワーは、電圧的には  $e = e_0$  で増幅していませんが、出力電流が増幅されているため、結果的に電力増幅をしていることとなります。出力インピーダンスが低い（数 100  $\Omega$  以下）のでケーブルを長く延ばすことができ、トリボ効果<sup>(1)</sup>によるケーブルノイズの発生も考える必要がなくなります。このボルテージフォロワーを小型にしてピックアップ本体に内蔵すれば、上記のような優れた長所を有する加速度ピックアップとすることができます。

### (3-3) 感度の表示法

圧電型加速度ピックアップにおいて、加速度  $a_0$  に一次的に比例するパラメータは、電圧  $V$  と電荷  $Q$  があります。したがって感度を表わす方法も電圧感度と電荷感度の2つの方法があります。

電圧感度は、加速度  $1g$  ( $9.8m/s^2$ ) 当りの出力電圧  $V$ 、すなわち  $V/g$  (実用単位:  $mV/g$ ) で表わされます。この場合、式2.3.4からもわかるように、接続されたケーブルの静電容量の影響を受けるため、一般には圧電体（ピックアップ本体）の静電容量と付属ケーブルの静電容

注(1) トリボ効果とは、ケーブルが強く曲げられたりねじられたりした場合にケーブルの絶縁体と導体が部分的に分離しその部分が一種のコンデンサを形成するもので、この電荷が放電すると、出力インピーダンスの高い圧電型加速度ピックアップはノイズの影響を受けます。(ローノイズケーブル使用により低減できます。) (P 36参照)

量を含めて表示しています。

電荷感度は、加速度  $1g$  当りの電荷  $c$  (クーロン) すなわち  $c/g$  (実用単位:  $pc/g$ ) で表します。この電荷感度は式 2、3、3 から明らかなように、容量負荷の影響は受けませんので、任意のケーブル長において感度は一定となります。

電圧感度を  $S_v$ 、電荷感度を  $S_q$  とすると両者の関係は、式 3、3、1 のようになります。

$$S_q = C \cdot S_v \quad (3.3.1)$$

$$\text{但し: } C = Cd + Cc \quad \begin{array}{l} Cd: \text{圧電体の静電容量} \\ Cc: \text{ケーブルの静電容量} \end{array}$$

ここで例として、静電容量が  $850pF$  の加速度ピックアップに  $1m$  当り  $75pF$  のケーブルを  $2m$  付けたときの電圧感度が  $50mV/g$  であったとします。この時の電荷感度は次のようになります。

$$\begin{aligned} S_q &= C \cdot S_v = (Cd + Cc) \cdot S_v \\ &= (850 \times 10^{-12} + 2 \times 75 \times 10^{-12}) \times 50 \times 10^{-3} \\ &= 5 \times 10^{-11} \text{ [c/g]} \\ &= 50 \text{ [pc/g]} \end{aligned}$$

また、電荷感度が  $100pc/g$  でピックアップ本体の静電容量が  $850pF$  のとき、それに  $1m$  当り  $75pF$  のケーブル  $5m$  を接続した場合のケーブル終端における電圧感度は、

$$\begin{aligned} S_v &= S_q / C = S_q / (Cd + Cc) \\ &= 100 \times 10^{-12} / (850 \times 10^{-12} + 5 \times 75 \times 10^{-12}) \\ &= 0.0816 \text{ [V/g]} \\ &= 81.6 \text{ [mV/g]} \end{aligned}$$

となります。

### (3-4) クロストーク

一般の圧電型加速度ピックアップは、加速度に対する感度が最大となる軸が1つあります。これを主軸感度と呼びます。特殊なタイプで2軸・3軸型もありますが、通常は固定ベース面に対してほぼ垂直方向に最大感度軸が一つあります。最大感度軸は、製作上ごくわずかな誤差があるため完全に垂直軸上にはありません。

図3、4、1で最大感度を  $max S_v$  とし、その軸が主軸 (Z軸) に対し  $\theta^\circ$  だけ傾いているとします。そのときの主軸感度  $S_v$  は、

$$S_v = max S_v \cos \theta \quad (3.4.1)$$

となります。また、最大横軸感度  $max S_{vt}$  は、

$$max S_{vt} = max S_v \sin \theta \quad (3.4.2)$$

となります。通常、クロストークは、主軸感度  $S_v$  に対する最大横軸感度  $max S_{vt}$  の百分率で表わされます。

$$\text{クロストーク} = \frac{max S_{vt}}{S_v} \times 100 = \tan \theta \times 100 \text{ [%]} \quad (3.4.3)$$

また、最大横感度軸 (X軸) から  $\varphi$  だけ傾いている軸方向の場合は、

$$S_{vt} = max S_{vt} \cos \varphi \quad (3.4.4)$$

となります。

当社のピックアップは、全てクロストークが5%以下 (通常1~2%以下) ですので一般の振

動計測には殆んど影響ありません。主軸感度 $S_v$ と横感度 $S_{vt}$ の指向性を図3、4、2・図3、4、3に示します。

特に、クロストークが問題になるような場合は、クロストークの小さい加速度ピックアップを選び、計測しようとする振動体の最大横振動の方向にピックアップの最小横感度軸（図3、4、3のY軸）を向けることにより、クロストークの影響を最小限にすることができます。

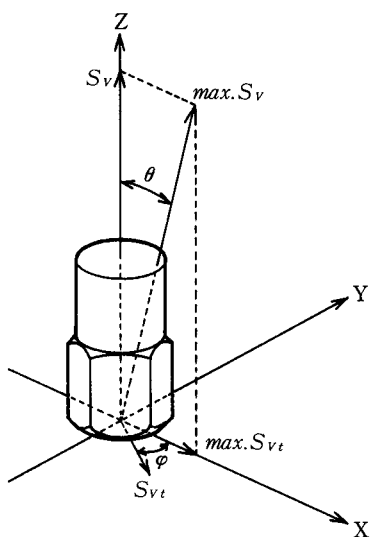


図 3.4.1 主軸 $S_v$ と横感度 $S_{vt}$ の関係

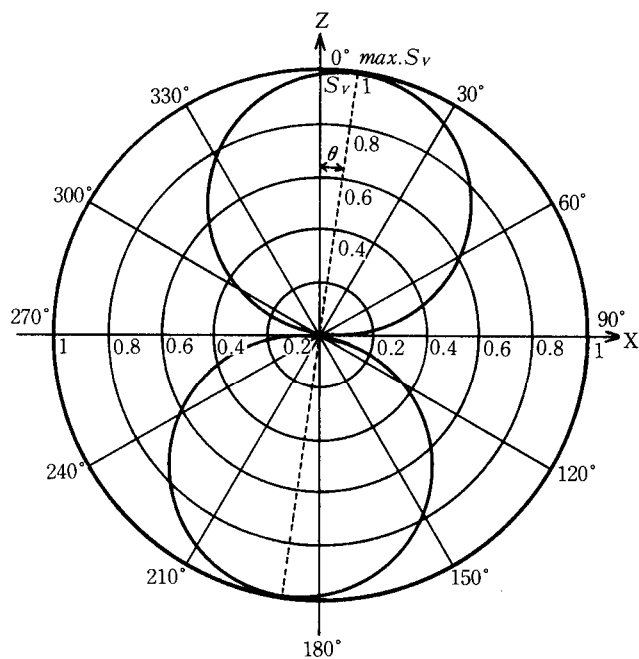


図 3.4.2 主軸感度 $S_v$ の指向性

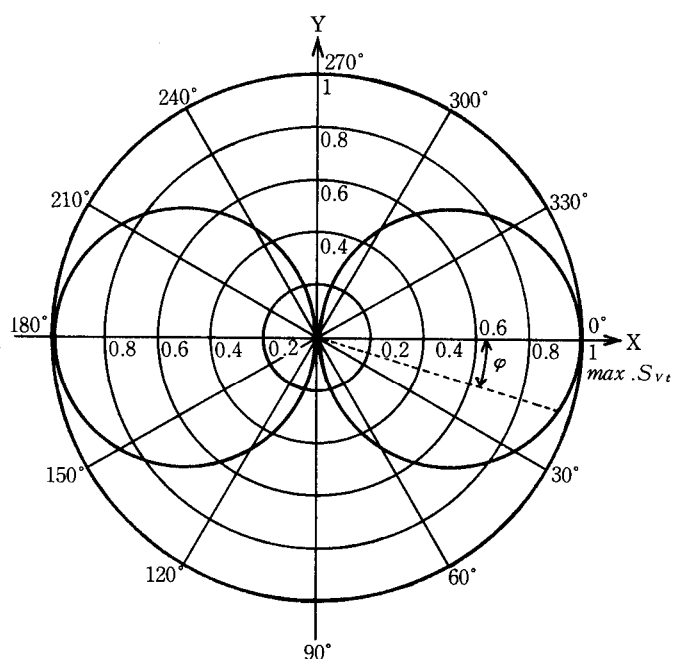


図 3.4.3 横感度 $S_{vt}$ の指向性

## 4. 周波数特性

### (4-1) 固有共振周波数

圧電型加速度ピックアップは基本的には質量 $m$ のおもり、バネ定数 $k$ の圧電体、空気抵抗などのダンパ $D$ 及びベースから構成されています。(図2、3、2参照)

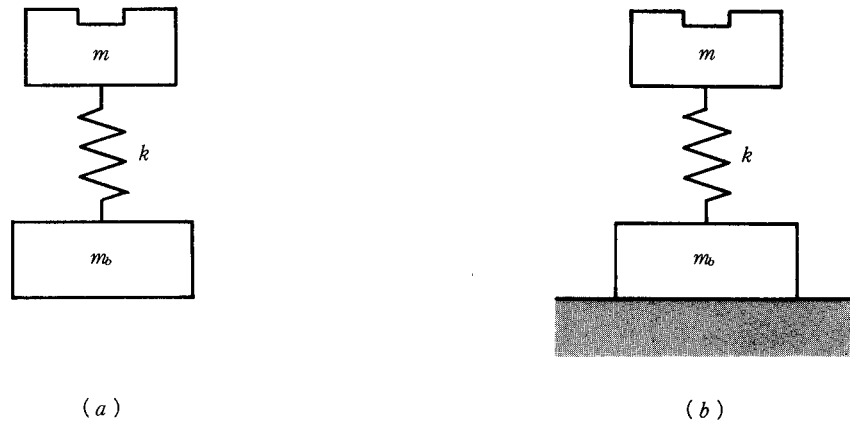


図 4.1.1 圧電型加速度ピックアップのバネ質量系

いま、ダンパ $D$ と外力がない振動を考えます。図4、1、1(a)は空間に自由に支えられている場合ですが、そのときの共振周波数は、

$$f_0 = f_n \sqrt{1 + \frac{m}{m_b}} \quad m_b : \text{ベースの質量} \quad (4.1.1)$$

となります。上式の $f_n$ はバネ質量系(おもり $m$ )の共振周波数で、次式で表わされます。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1.2)$$

図4、1、1(b)は、ベースを無限大の質量に固定したものでこの場合は $m_b \gg m$ となり $f_0 \cong f_n$ となります。この $f_n$ を不減衰固有共振周波数と呼びます。

次に減衰がある場合を考えます。実際の自由振動は永続することではなく、なんらかの減衰によって時間と共に弱くなります。

減衰の状態は減衰比 $h$ の大きさによって決まり、次の3つの状態に分類されます。なお、減衰比 $h$ は減衰係数 $D$ と臨界減衰が起こる減衰係数 $D_c$ との比、すなわち $D/D_c$ で定義されます。

- $h < 1$  不足減衰
- $h = 1$  臨界減衰
- $h > 1$  超過減衰

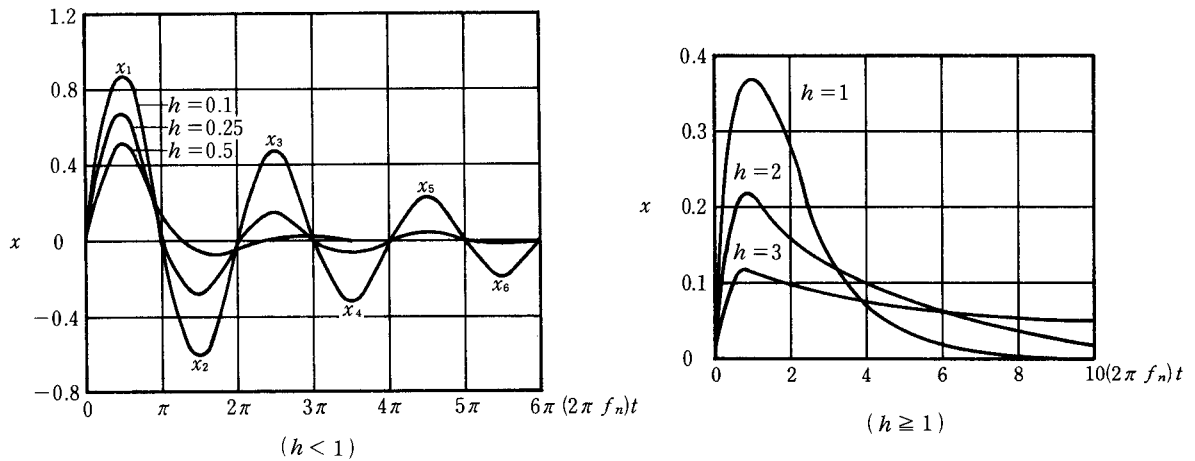


図 4.1.2 減衰自由振動

$h < 1$  の場合、相次ぐ振幅の比は次式で表わされます。

$$\left| \frac{x_1}{x_2} \right| = \left| \frac{x_2}{x_3} \right| = \left| \frac{x_3}{x_4} \right| = \dots = \left| \frac{x_n}{x_{n+1}} \right| = e^{\frac{\pi h}{\sqrt{1-h^2}}} \quad (4.1.3)$$

つまり、包絡線は、時間と共に指数関数的に減少することがわかります。その時の共振周波数を  $f_d$  とすると、

$$f_d = f_n \cdot \sqrt{1-h^2} \quad (4.1.4)$$

と表わすことができます。この  $f_d$  を減衰固有共振周波数と呼びます。

$h \geq 1$  の場合は  $f_d = 0$  となり、振動性を失った無周期運動となります。振動計測の精度上減衰自由振動はできるだけ速やかに減衰させることが必要ですが、減衰比  $h$  を大きくしてもかならずしも有利ではないことが図 4、1、2 からわかります。

減衰比  $h$  の大きさは、共振の鋭さ、つまり  $Q_m$  の値にも影響します。 $h$  が小さいほど  $Q_m$  は大きくなり、鋭い共振となります。その関係を式 4、1、5 に示します。

$$Q_m = \frac{1}{2h\sqrt{1-h^2}} \quad (4.1.5)$$

圧電型加速度ピックアップの場合は、 $h$  をできるだけ小さくして  $Q_m$  を大きくし共振を鋭くすることによってフラットな周波数範囲が広くなるように設計されています。

#### (4-2) 電荷増幅における低域遮断周波数

チャージアンプでは、ピックアップに発生した電荷はすべてフィードバック容量  $C_f$  にチャージされることはすでに述べました。(図 3、1、1 参照) したがって低域特性は入力回路の時定数(ケーブル容量  $C_c$  やピックアップ容量  $C_d$  など)には無関係となり、フィードバック回路の時定数  $C_f \cdot R_f$  によって決まることになります。すなわち低域遮断周波数  $f_c$  は、

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_f R_f} \quad (4.2.1)$$

となります。一般に  $R_f$  は数  $10\text{M}\Omega$  以上の高抵抗値を選ぶため、 $C_f$  のリアクタンスより十分大きくなります。したがって、実際には  $f_c$  の値は  $C_f$  の値で決まります。 $C_f$  の値を大きくすれば  $f_c$  は低くなり低域での振動計測に有利となります。しかしこれも限度があり、式 3、1、4 から明らかかなように  $C_f$  の値をあまり大きく選ぶと電荷-電圧の変換率が低下するので感度が下がり結果的

に S/N 比の悪化につながります。一般的には、1000pF 程度の値を選んでいるものが多いようです。

#### (4-3) 電圧増幅における低域遮断周波数

圧電型加速度ピックアップをボルテージアンプに接続した場合の等価回路を図 4.3.1 に示します。

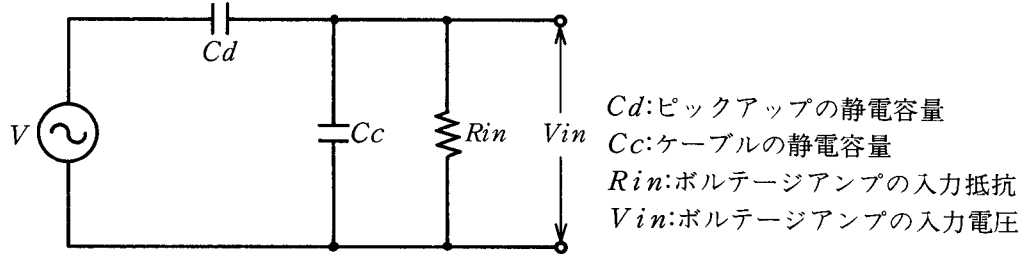


図 4.3.1 電圧増幅の等価回路

図中、 $V$  と  $Vin$  の関係は次式で表わされます。

$$\left| \frac{V_{in}}{V} \right| = \frac{\omega R_{in} C_d}{\sqrt{1 + \omega^2 R_{in}^2 (C_d + C_c)^2}} \quad (4.3.1)$$

低域遮断周波数  $f_c$  においては、 $|V_{in}/V| = 1/\sqrt{2}$  ですから、式 4.3.1 の分母を  $1 + \omega^2 R_{in}^2 (C_d + C_c)^2 = 2$  とおいて

$$\omega_c = \frac{1}{(C_d + C_c) \cdot R_{in}} \quad (4.3.2)$$

となり、 $f_c$  は

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{in} (C_d + C_c)} \quad (4.3.3)$$

となります。式 4.3.3 から明らかなように、電圧増幅における低域遮断周波数は、ピックアップからボルテージアンプまでの入力回路の時定数によって決まります。したがって  $C_d$  の大きな加速度ピックアップを選べば  $f_c$  は低くなり低域振動計測には有利となります。また、ケーブル容量  $C_c$  が大きくなっても  $f_c$  は低くなりますが、式 3.2.1 からわかるように、あまり  $C_c$  の値が大きくなると逆に感度が低下して S/N 比の悪化につながります。 $R_{in}$  を大きくした場合は効果があり、ボルテージアンプの入力インピーダンスは大きい程有利になります。

#### (4-4) 接触共振周波数と高域特性

加速度ピックアップを振動体に取付けると一つの振動系が形成され、その系の固有共振周波数が決まります。これを接触共振周波数と呼びます。

接触共振周波数は加速度ピックアップのベース底面と振動体の面との固定方法や接触状態によってさまざまに変化します。(式 4.4.1)

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_0}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kg}{W}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{SE}{lW}} \quad (4.4.1)$$

$m_0$ : ピックアップの質量       $l$ : バネの振動方向の長さ  
 $k$ : バネ定数                       $S$ : バネの断面積  
 $W$ : ピックアップ重量           $E$ : ヤング率  
 $g$ : 重力加速度



図4、4、1は加速度ピックアップ（P51）を上仕上げ面にシリコンオイルを介し十分なトルク（50kg-cm）でネジ固定した場合の接触共振周波数です。

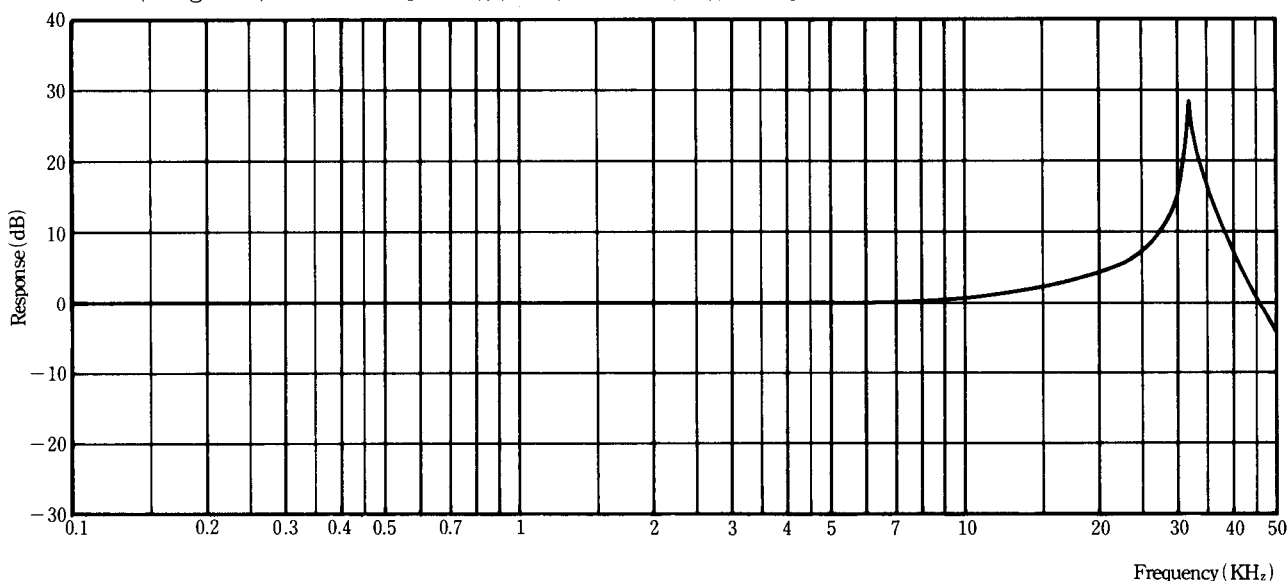


図 4.4.1 接触共振周波数

これは、加速度ピックアップが理想的な状態で固定された場合の周波数特性で、そのピックアップが持っている性能を最大限に発揮できます。この場合の共振周波数 $f_r$ は、前項で述べた固有共振周波数 $f_n$ に非常に近いものとなります。カタログデータの共振周波数はこの $f_r$ の値が記されています。

現場で実際に使用する場合は、なるべく固定面を平らにし接触面にオイルやグリスを充填し、理想的な固定状態に近づけるようにすることが必要です。しかし、実際に振動計測を行なう場合は必ずしも上記のような固定ができるとは限りません。被測定物によってはそれに直接タップが立てられないこともあり、いろいろなオプションパーツを使って固定する場合があります。

以下にさまざまな固定方法における接触共振周波数の代表例を示します。

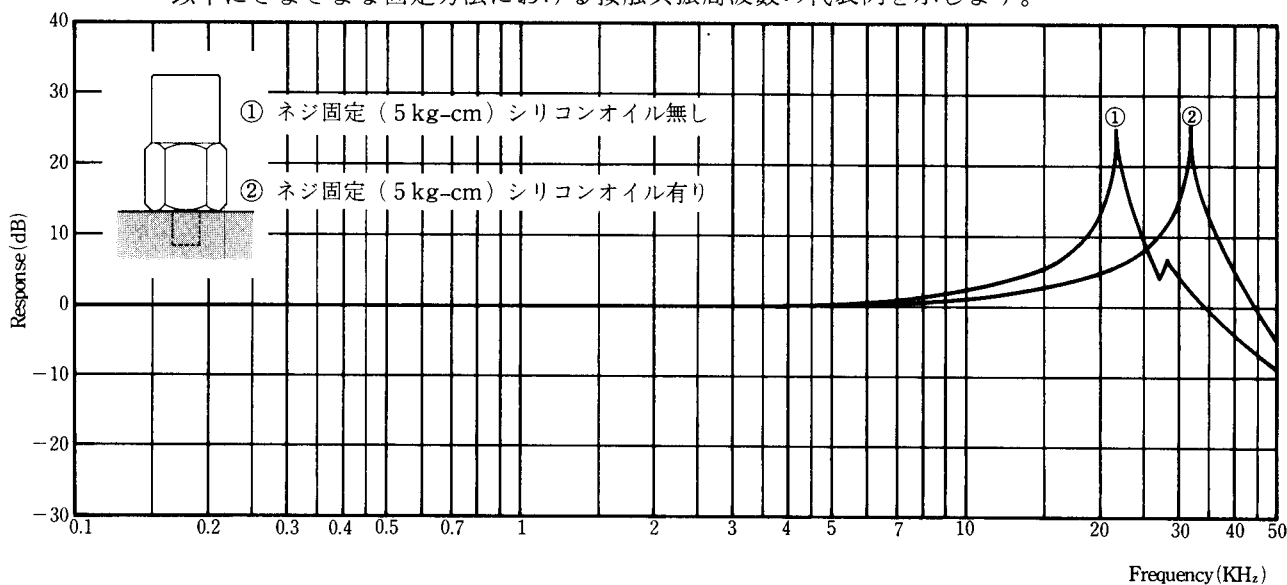


図 4.4.2 ネジ固定におけるシリコンオイルの効果

加速度ピックアップをネジで固定する使い方は最も基本的な方法でピックアップ自身もこの方法で使用されることを前提として設計されています。したがって実際に使用する場合もなるべくネジで固定できるような面を選んで下さい。

締付けトルクを一定にして、その接触面にシリコンオイルを塗布した場合の効果を図4、4、2に示します。オイル無しの場合22KHzであった $f_r$ が、オイルを介することにより32KHzまで上

昇します。それに伴ってフラット範囲も広がり、振動計測にはより有利となります。

これは一例ですが、ほとんどの場合オイルを介することによりフラット範囲が広がります。この理由はオイルが接触面のデコボコを埋めて見かけ上接触面積 $S$ （式4、4、1）を増やし接触剛性を高める効果があるためです。そして、締付けトルクの大小による共振点の変化も少なくなり、再現性のよい安定した計測を行なうことができます。

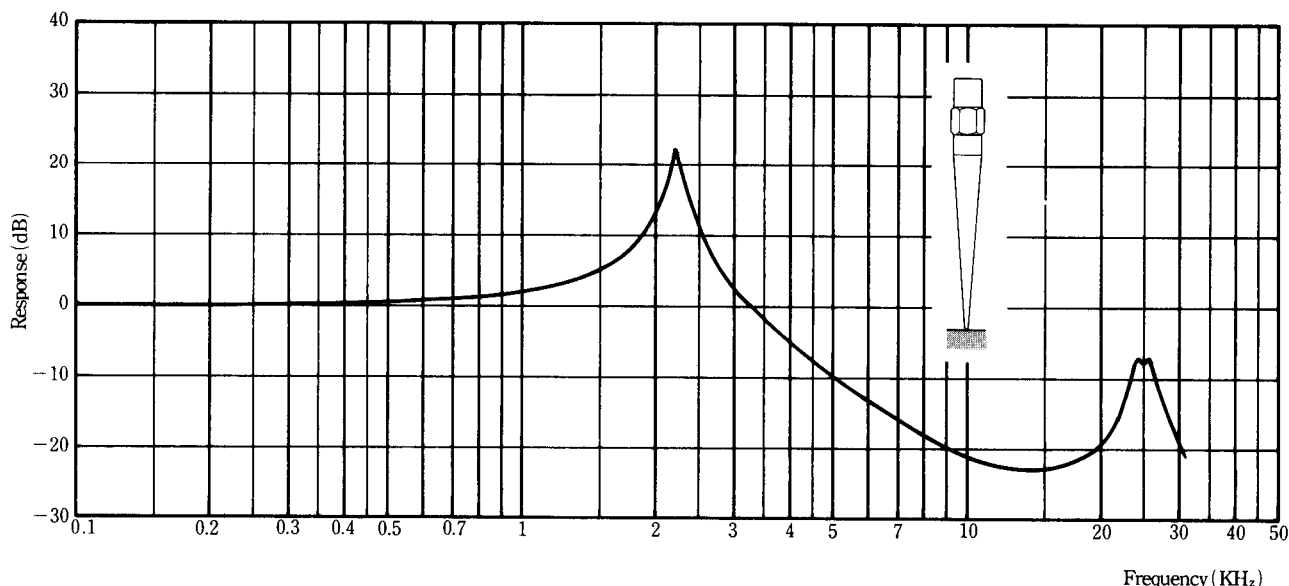


図 4.4.3 探触針使用の場合の周波数特性

ネジ固定ができないようなせまい場所や、十分な接触面積が得られない細いパイプなどの振動計測には探触針を使用します。図4、4、3は長さ100mmのステンレス製探触針をP51に取付けた場合の周波数特性で、約2KHzに共振点があります。計測可能な周波数範囲は1KHz以下となりますが、比較的的低域周波数の振動計測には十分実用になります。

共振点以上の周波数については、加速度ピックアップの機種と探触針の組合せを決めると、再現性ある周波数特性カーブが得られる傾向がありますので、バンドパスフィルターやイコライザーと組合せることにより、高域振動計測にも応用することができます。

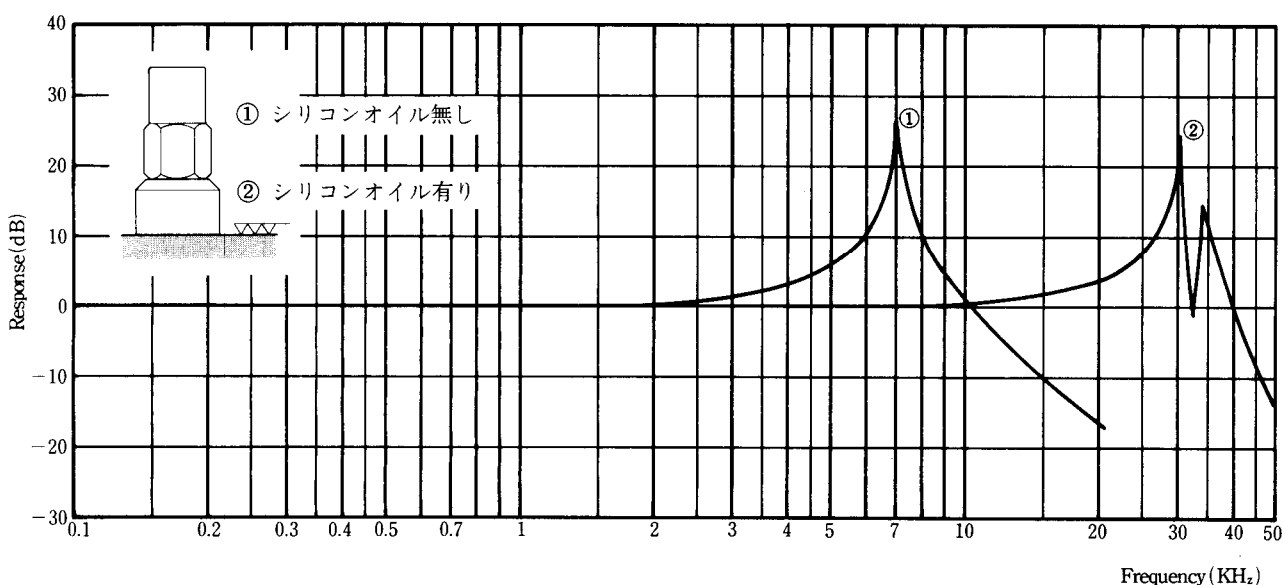


図 4.4.4 マグネットホルダーとシリコンオイルの効果

被測定物が磁石に吸着する金属でできている場合はマグネットホルダーを使用することができます。しかしこの方法は、あくまで予備計測などの簡易的な固定方法となります。

図4.4.4は、マグネットホルダーを使用して固定した場合の周波数特性ですが、この場合もシリコンオイルの効果が現われています。取付け面の表面状態がいい場合はシリコンオイルを塗布することによってネジ固定にかなり近いフラット範囲が得られます。

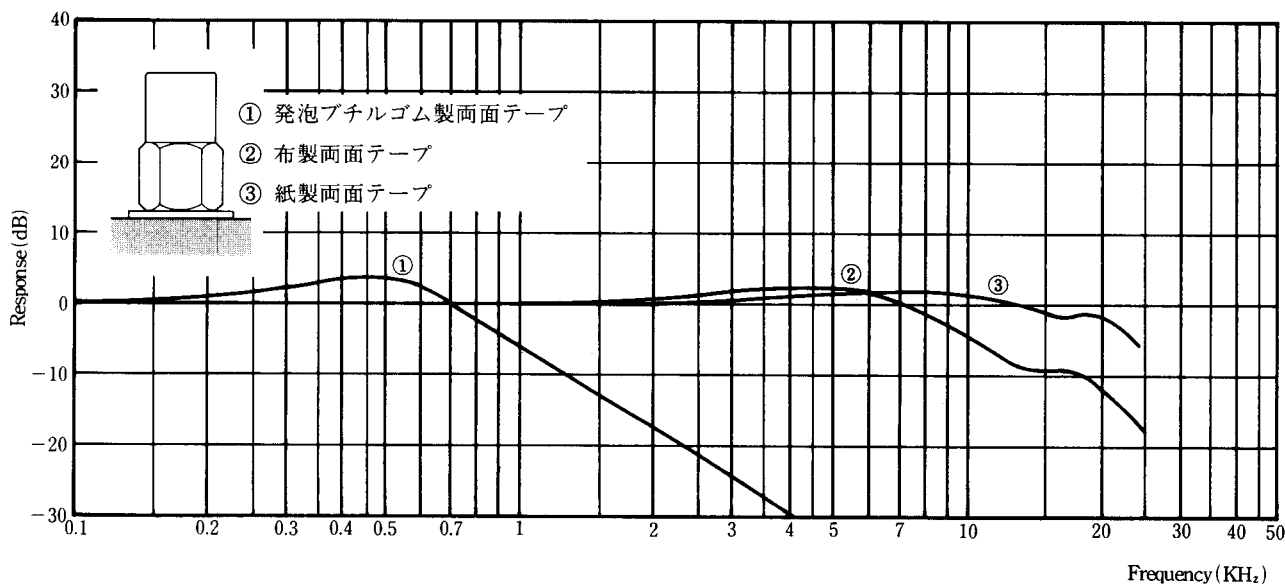


図 4.4.5 両面接着テープによる固定

振動レベルや周波数が比較的低い場合は両面接着テープで固定することができます。両面接着テープは本来振動を吸収しやすい材料でできているために基本的には振動計測を目的とする固定には適しません。しかし、振動周波数が低く、しかも振幅が小さい場合、或は重量の軽い加速度ピックアップを固定する場合には、一時的な計測としてたいへん便利な方法です。

図4.4.5は市販されている各種両面接着テープを使用して固定した場合の周波数特性です。紙製両面接着テープを使用した場合(③)、貼付け条件がよければ10KHz付近まで計測できることがわかります。(P51の場合)

#### (4-5) 感度と共振周波数

一般に圧電型加速度ピックアップは、(他の方式の振動ピックアップも同様ですが) 同じ圧電体を使った場合、感度を高くすると固有共振周波数は低くなり、固有共振周波数を高くすると感度は低くなるという関係があります。これは、使用している圧電体の圧電定数( $d_{33}$ )が一定ですから感度の変更は主におもりの重さを変えるという方法で行なっているためです。このことは、式2.3.4と式4.1.2から明らかです。式2.3.4を式4.1.2に代入し $f_n$ と $V$ の式で表わすと次のようになります。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \cdot a_0 \cdot d_{33}}{V \cdot C}} \quad (4.5.1)$$

$$V = \frac{k \cdot a_0 \cdot d_{33}}{C(2\pi \cdot f_n)^2} \quad (4.5.2)$$

すなわち、両式から

$$f_n^2 \propto \frac{1}{V} \quad (4.5.3)$$

の関係を導き出すことができます。

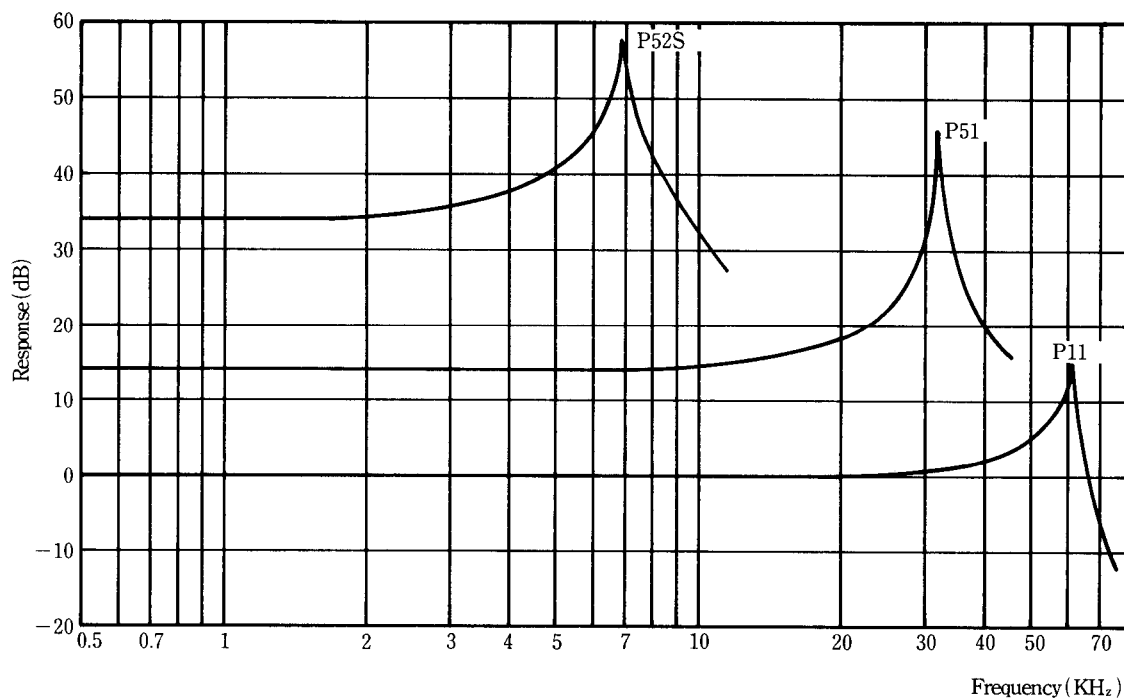


図 4.5.1 感度と共振周波数の関係

図 4、5、1 は感度の異なる加速度ピックアップの周波数特性を同一グラフ上に描いたものです。(P52S : 500 mV/g、P51 : 50 mV/g、P11 : 10 mV/g)

## 5. 位相特性

加速度ピックアップのおもりは、ベース変位の位相に対して常に遅れています。そのときの遅れ時間  $\Delta t$  及び位相角  $\phi$  は次式で表わされます。

$$\Delta t = \left| \frac{\phi}{2\pi f} \right| \quad (5.1.1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2h\nu}{1-\nu^2} \quad (5.1.2)$$

$f$  : 任意の周波数  
 $h$  : 減衰比  
 $\nu$  : 振動数比 ( $f/f_n$ )

上式から明らかなように位相特性は減衰比  $h$  の値によって決まり、時間遅れは、位相角と周波数によって決まることがわかります。図 5.1.1 は減衰比に対する位相角と振動数比の関係を表わしたものです。

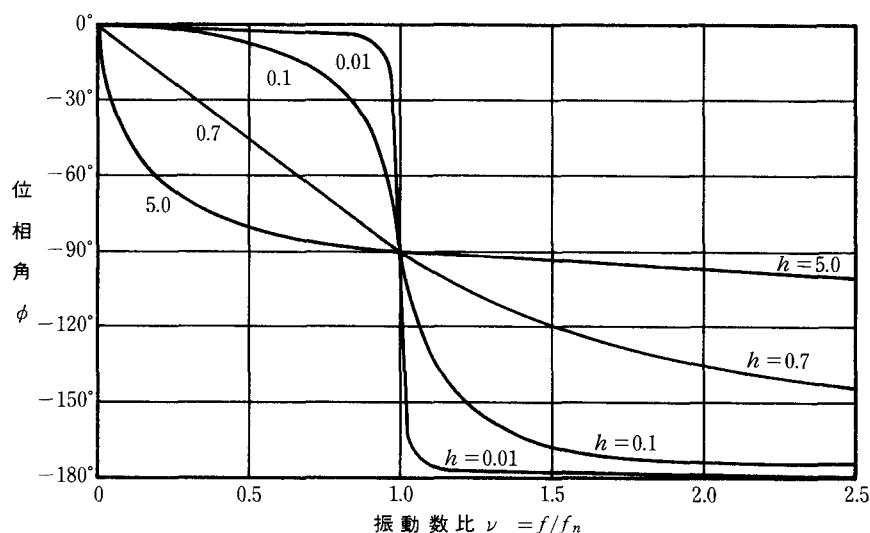
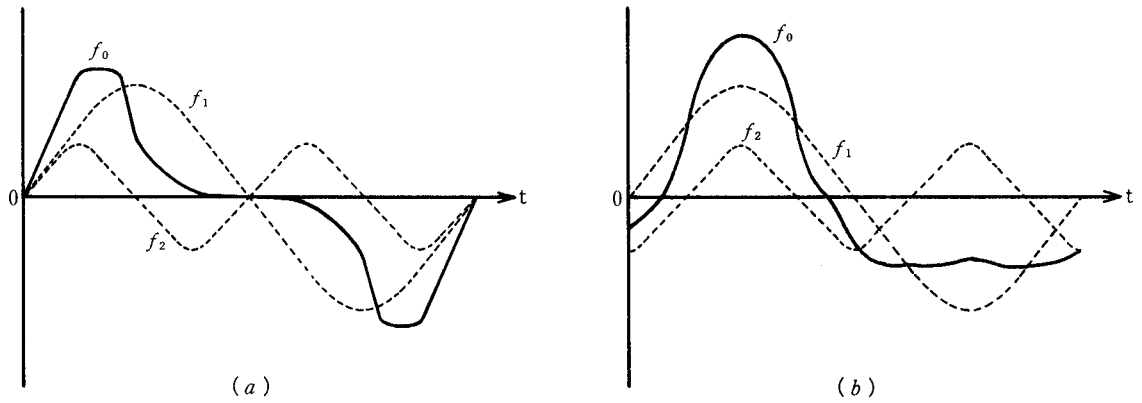


図 5.1.1 加速度ピックアップの位相特性

単一周波数の振動計測の場合には位相特性はあまり問題になりませんが、周波数の異なる振動が合成された波形や衝撃振動計測などの場合は特に重要になってきます。すなわち、各周波数成分の時間遅れ  $\Delta t$  が一様でないために位相歪が生じます。

位相歪の影響を少なくするには、①時間遅れ  $\Delta t$  をできる限り小さくする。すなわち加速度ピックアップの減衰比  $h$  を可能な限り小さくする。②位相歪は周波数に対する時間遅れを一定にすればよい。すなわち減衰比  $h$  を 0.7 前後に選び周波数に対する時間遅れを比例関係にすればよい。以上の 2 つの方法があります。

当社の圧電型加速度ピックアップは、①の方法で位相歪の問題を解決しています。減衰比  $h$  は全製品にわたり  $h < 0.01$  を確保しており、共振が生ずる周波数帯域は、比較的狭くなっています。(式 4.1.5 参照)



$f_1, f_2$ 共に時間遅れが一定の加速度ピックアップで計測した振動波形。(位相歪無し)

$f_1$ の時間遅れに対し、 $f_2$ の時間遅れが大きい加速度ピックアップで計測した振動波形。(位相歪波形)

図 5.1.2 加速度ピックアップの位相歪

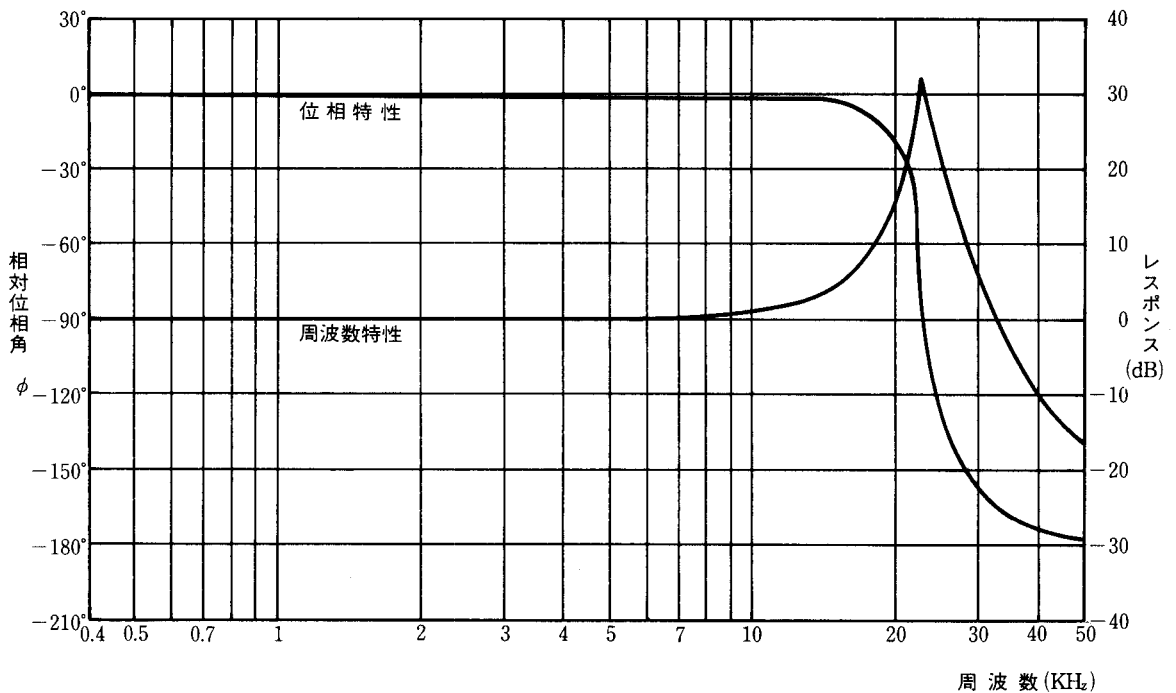


図 5.1.3 減衰比  $h$  の小さい加速度ピックアップの周波数特性と位相特性

共振周波数よりも十分低い周波数では図5.1.3に示すように、ピックアップのバネ質量系の位相のずれは小さく、振動計測にとって殆んど問題ありません。しかし、共振周波数に近づくとつれて徐々に位相がずれ始め、時間遅れも大きくなっていきます。共振点で、ちょうど $90^\circ$ 遅れますが、振動波形の中にこの付近の周波数成分が含まれていると位相歪が生じます。

## 6. ダイナミックレンジと直線性

加速度ピックアップのベースが受けた加速度と出力電圧が直接比例する範囲をダイナミックレンジといいます。

圧電型加速度ピックアップのダイナミックレンジはたいへん広く理論的には下限はゼロまで下がり、上限は数1000gまで直線性があります。実際は、下限についてはピックアップの出力がゼロになる前に測定系のアンプのノイズレベルや外来ノイズによって制限を受けることとなりますので低いレベルの振動計測を行なう場合は計測システム全体にわたって高いS/N比を確保することがたいせつです。最大加速度についてはカタログにもうたわれていますが、ピックアップの機種によって異なります。これはピックアップの構造や圧電体の機械的強度或はバネ質量系のプリロードなどによって決まります。

一般に、高いレベルの振動計測には負荷質量の小さい比較的小型の加速度ピックアップが使用されます。

カタログの最大加速度は主軸方向に対するものですが、横方向に対してもこれ以下であれば問題ありません。しかし、接触共振周波数付近の周波数で高レベルの連続振動や衝撃振動が加わった場合、共振により異常励振されて最大加速度をオーバーし、場合によっては、ピックアップが破壊されることもあります。たとえば、ピックアップを20cm上から机の上に落すと1000g以上、1m上からコンクリートの床に落すと数千～数万gにも達する衝撃加速度が発生しますので取扱いは特に注意が必要です。

プリアンプ内蔵型の場合は、内蔵されているプリアンプの最大出力電圧によって決まります。プリアンプの入出力直線範囲の上限がダイナミックレンジの上限となります。たとえば直線範囲の上限が3V(p-p)のプリアンプの場合、100mV/gのピックアップは±15g、10mV/gのピックアップは±150gとなります。

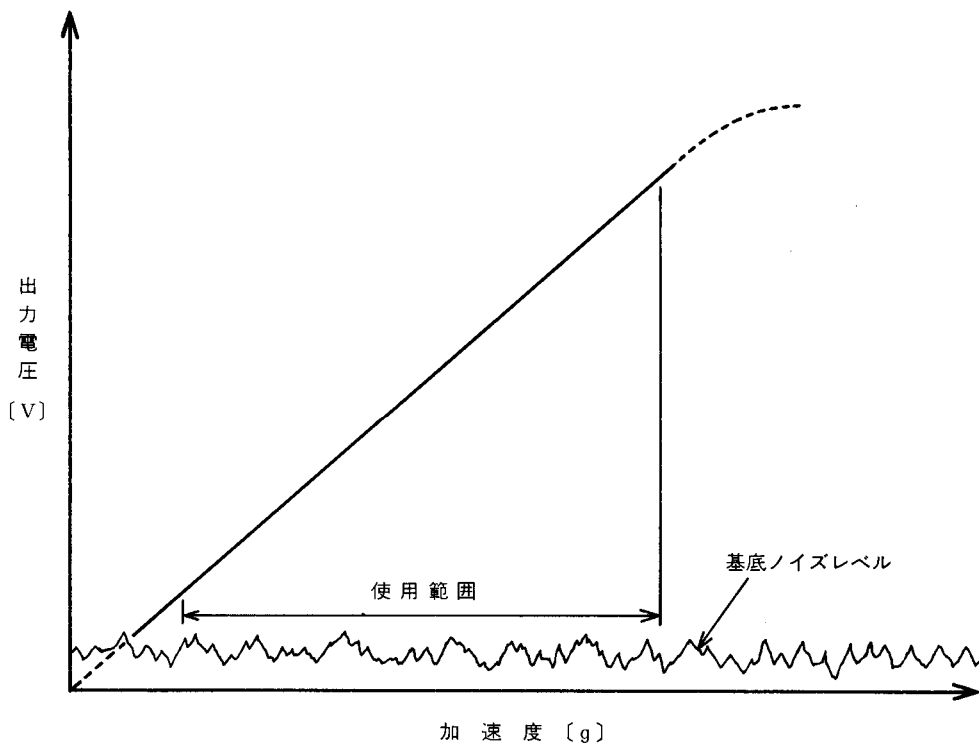


図 6.1.1 加速度ピックアップのダイナミックレンジ

## 7. 過渡応答

### (7-1) ゼロシフト

衝撃波形を計測する場合、その計測システムの低域特性つまり衝撃波形のパルス幅  $T$  と計測システムの入力部時定数  $\tau$  との比が重要になってきます。

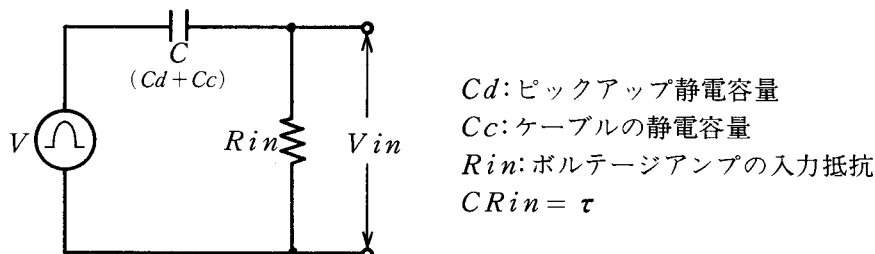


図 7.1.1 ボルテージアンプと圧電型加速度ピックアップを組合わせた場合の等価回路

図 7.1.1 はボルテージアンプの入力部等価回路ですが、これは時定数  $\tau = CRin$  のハイパスフィルターと考えることができます。パルス幅  $T$  に対し時定数  $\tau$  が十分大きい場合はそれ程計測に誤差は生じませんが、 $\tau$  が小さいとパルス幅  $T$  に対しピーク値を維持できず指数関数的に減衰します。

ここでは単発半正弦波および単発矩形波を図 7.1.1 の回路に印加した場合の応答特性を調べてみます。

まず、単発半正弦波を図 7.1.1 の回路に印加した場合の任意の瞬時値は次式で表わすことができます。

$$\begin{aligned}
 Vin(t) = & \frac{\pi\left(\frac{\tau}{T}\right)}{1+\pi^2\left(\frac{\tau}{T}\right)^2} \left\{ \cos\frac{t}{T}\pi + \frac{\tau}{T}\pi \sin\frac{t}{T}\pi - e^{-\frac{t}{\tau}} \right. \\
 & + \cos\left(\pi\frac{t-T}{T}\right)u(t-T) + \frac{\tau}{T}\pi \sin\left(\pi\frac{t-T}{T}\right)u(t-T) \\
 & \left. + e^{-\frac{1}{\tau}(t-T)}u(t-T) \right\} V
 \end{aligned} \tag{7.1.1}$$

式 7.1.1 を代表的な時定数についてグラフ化すると図 7.1.2 (a) のようになります。図からもわかるように  $\tau/T$  が小さくなると次第にピーク値の誤差が大きくなります。ピーク値の誤差を 5% 以下にするためには  $\tau/T \geq 7$ 、又 2% 以下にするためには  $\tau/T \geq 16$  の時定数が必要です。

同様に、単発矩形波を図 7.1.1 の回路に印加した場合の瞬時値は、

$$Vin(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \{1 - e^{-\frac{t}{\tau}} u(t-T)\} V \tag{7.1.2}$$

となり、グラフ化すると図 7.1.2 (b) のようになります。上式より、誤差を 5% 以下にするためには  $\tau/T \geq 20$  又 2% 以下にするには  $\tau/T \geq 50$  の時定数が必要です。

なお、チャージアンプを使用する場合は、計測システムの低域特性は、チャージ・アンプのみによって決まります。時定数をフィードバック容量  $Cf$  とフィードバック抵抗  $Rf$  の積、つまり  $\tau = CfRf$  として計算すれば同様の結果が得られます。

ここで例として、 $T=50\text{ms}$  の単発半正弦波の衝撃波形のピーク値を 2% の精度で測定したいとします。計測システムの入力部容量 (ピックアップ本体+ケーブル容量+アンプの入力容量) が、 $1500\text{pF}$  のときのボルテージアンプの入力抵抗は、 $\tau/T=16$  より



$$\begin{aligned}
 R_{in} &= \frac{16T}{C} \\
 &= \frac{16 \times 50 \times 10^{-3}}{1500 \times 10^{-12}} \\
 &= 533 \text{ M}\Omega
 \end{aligned}$$

となります。もし、アンプの入力抵抗が100MΩの場合は、

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{16T}{R_{in}} \\
 &= \frac{16 \times 50 \times 10^{-3}}{100 \times 10^6} \\
 &= 8000 \text{ PF}
 \end{aligned}$$

となり、8000-1500=6500 PFの静電容量を加えるか、或は、この分のケーブルを延長すればよいことになります。但しピックアップからの出力電圧は

$$V_s = V_{in} \frac{C}{C+C_c} \quad \begin{array}{l} V_s: \text{外部容量を加えた場合の出力電圧} \\ C_c: \text{外部容量} \end{array} \quad (7.1.3)$$

の割合いで小さくなります。

なお、プリアンプ内蔵型加速度ピックアップの場合は、低域遮断周波数を $\omega_c$ とすると、入力部時定数 $\tau$ は、次式で求められます。

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (7.1.4)$$

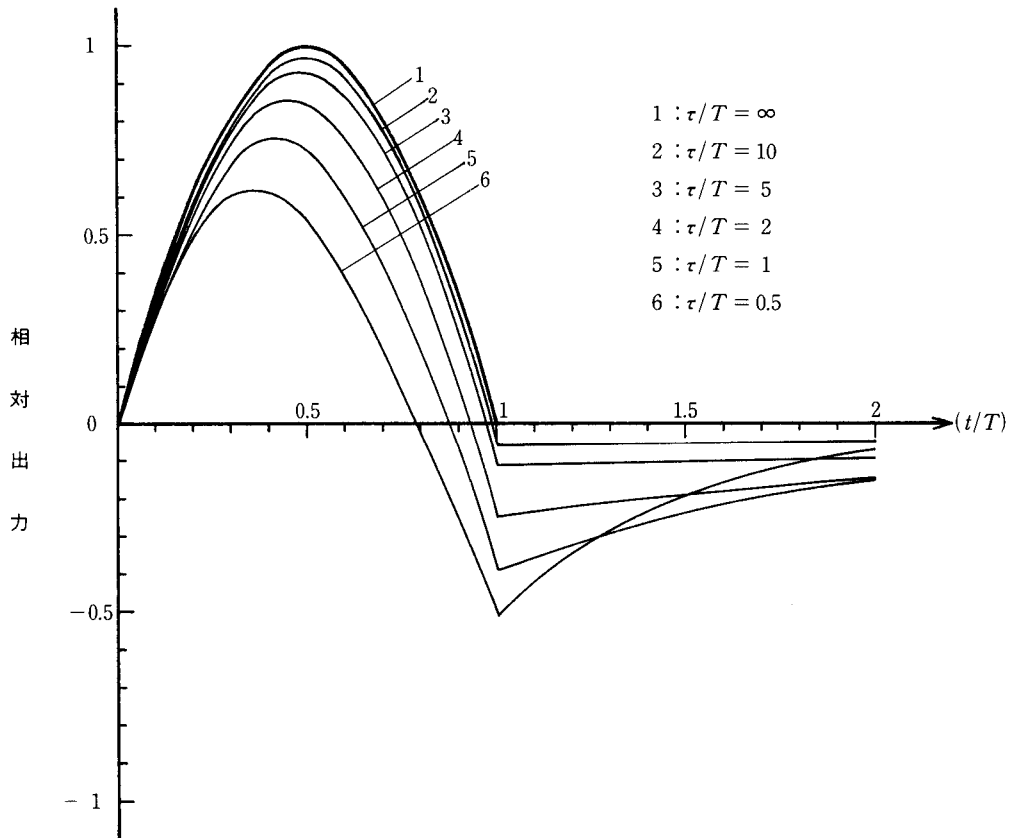


図 7.1.2 (a) 単発半正弦波の応答

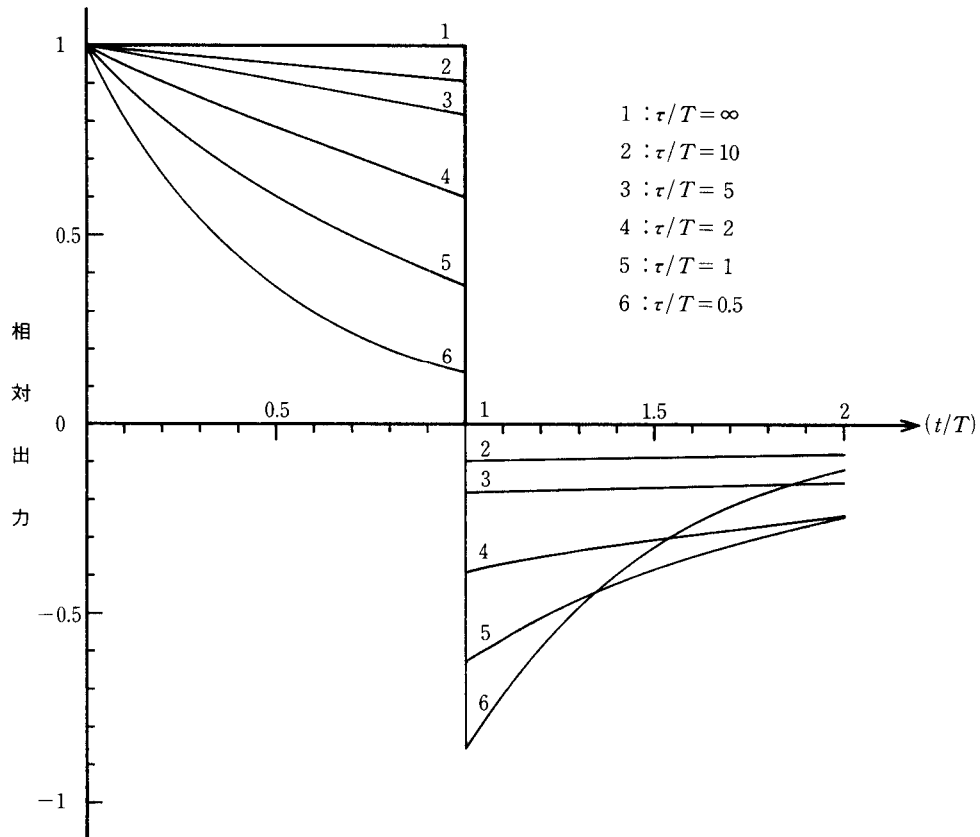


図 7.1.2 (b) 単発矩形波の応答

### (7-2) リンギング

一般に圧電型加速度ピックアップは減衰比  $h$  をできる限り小さくするように作られています。 $(h < 0.01)$  そのため、衝撃が加わるとピックアップの固有共振周波数で励振され、衝撃の原波形にリンギングとして重なってきます。先の「ゼロシフト」がピックアップの低域特性に依存していたのに対し「リンギング」は高域特性に影響されます。

リンギングの振幅の大きさは衝撃波形のパルス幅  $T$  と加速度ピックアップの固有共振周波数の周期  $T_n$  の比つまり  $T_n/T$  の値によって決まります。

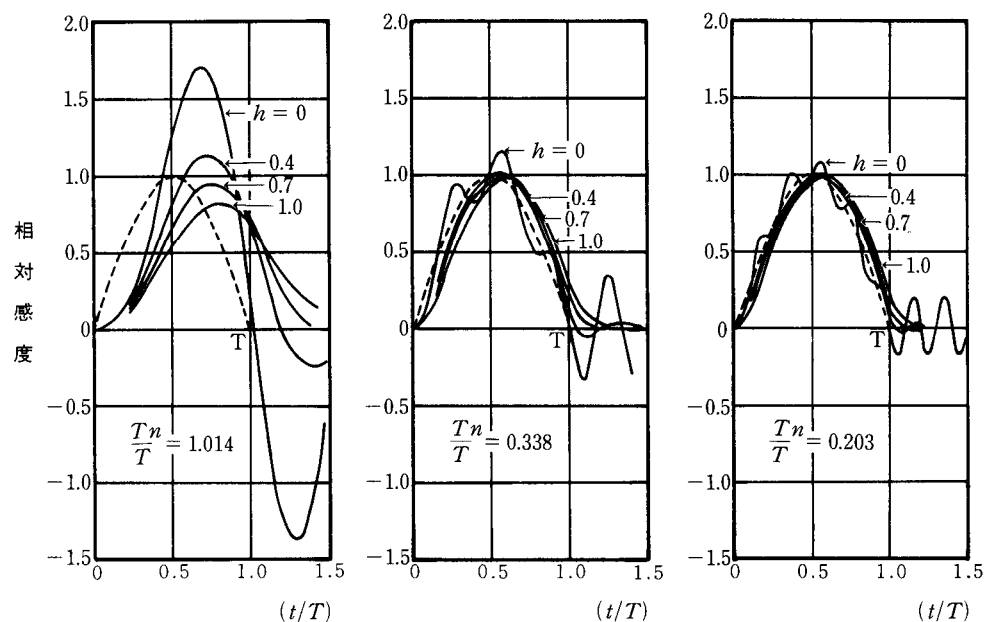


図 7.2.1 圧電型加速度ピックアップのリンギング

図7.2.1は、単発半正弦波について代表的な減衰比 $h$ に対し $T_n/T$ の値を変えた場合のリングングの程度を図示したものです。 $T_n/T$ の値が小さくなる程リングングによる誤差が小さくなることがわかります。

リングングの影響を少なくするためには、固有共振周波数の高いピックアップを使用する必要があります。単発半正弦波および単発三角波の衝撃波の場合、ピーク値の誤差を10%以内にするためには固有共振周波数の周期 $T_n$ は $1/5 T$ 以下である必要があります、5%以内の場合は $1/10 T$ 以下であることが必要です。たとえば、 $200\mu\text{s}$ のパルス幅を持つ衝撃波を誤差10%以内で計測するには、ピックアップの周期 $T_n$ は $40\mu\text{s}$ 以下つまり25KHz以上の固有共振周波数が必要です。5%以内とするためには、50KHz以上のピックアップが必要となります。しかし、衝撃波がきれいな半正弦波或は、三角波であればこの目安は参考になりますが、衝撃波が歪んでいる場合は、その高調波成分によってピックアップの固有共振周波数を異常に励振する可能性がありますので、ピックアップの固有共振周波数は余裕を見て高いものを使用した方がよいでしょう。

リングングの影響を少なくするもう一つの方法は、リングング周波数つまりピックアップの固有共振周波数の約半分のカットオフ周波数をもつ12dB/octか18dB/octのローパスフィルターを使うことによって減衰させることができます。

## 8. 環境条件

### (8-1) 使用温度範囲

加速度ピックアップのカタログデータには最大使用温度が記されています。この温度は、ピックアップ内部に使用されている接着剤や樹脂によっても制限を受けますが、主に圧電体〔 $\text{Pb}(\text{Zr}\cdot\text{Ti})\text{O}_3$ 〕のキュリー点<sup>(1)</sup>によって決められています。

図8、1、1は加速度ピックアップに使用されている圧電体（C-6系）の比誘電率および電気機械結合係数の温度変化を示したものです。温度が高くなると徐々に圧電性が低下し、キュリー点付近では急激に劣化を始め、キュリー点では分極が消失し圧電性を失います。

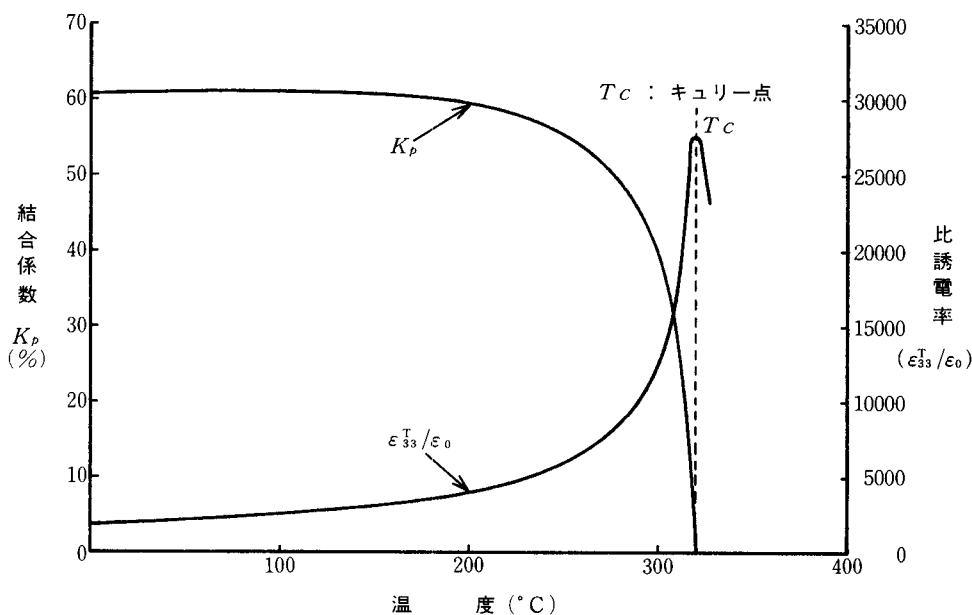


図 8.1.1 圧電体の温度特性

当社ではキュリー点の約半分の温度を最大使用温度としています。最大使用温度を越えて使用した場合、特にキュリー点付近まで加熱されて分極が消失してしまったものは常温まで冷却しても、元の状態には戻りませんので注意して下さい。

### (8-2) 温度特性

圧電型加速度ピックアップの感度は温度によって変化します。その一例を図8、2、1に示します。この例では、 $-20^{\circ}\text{C}$ から $50^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化率が $\pm 5\%$ 以内ですから特に感度補正の必要はないでしょう。一般に温度が高くなると静電容量 $C$ と電荷感度 $S_q$ は大きくなり、電圧感度 $S_v$ は小さくなります。但し、電荷感度については圧電材料の組成により温度係数が正になったり負になったりします。

注(1) キュリー点とは、圧電体の結晶変態点であり、強誘電体から常誘電体へ移りかわる温度です。この温度以上では自発分極及び残留分極が共に消失するので圧電性も同時に失われます。再びキュリー点以下に冷却した場合は、自発分極は復元して強誘電体に戻りますが残留分極は復元しませんので、結局圧電性は失われたままとなります。

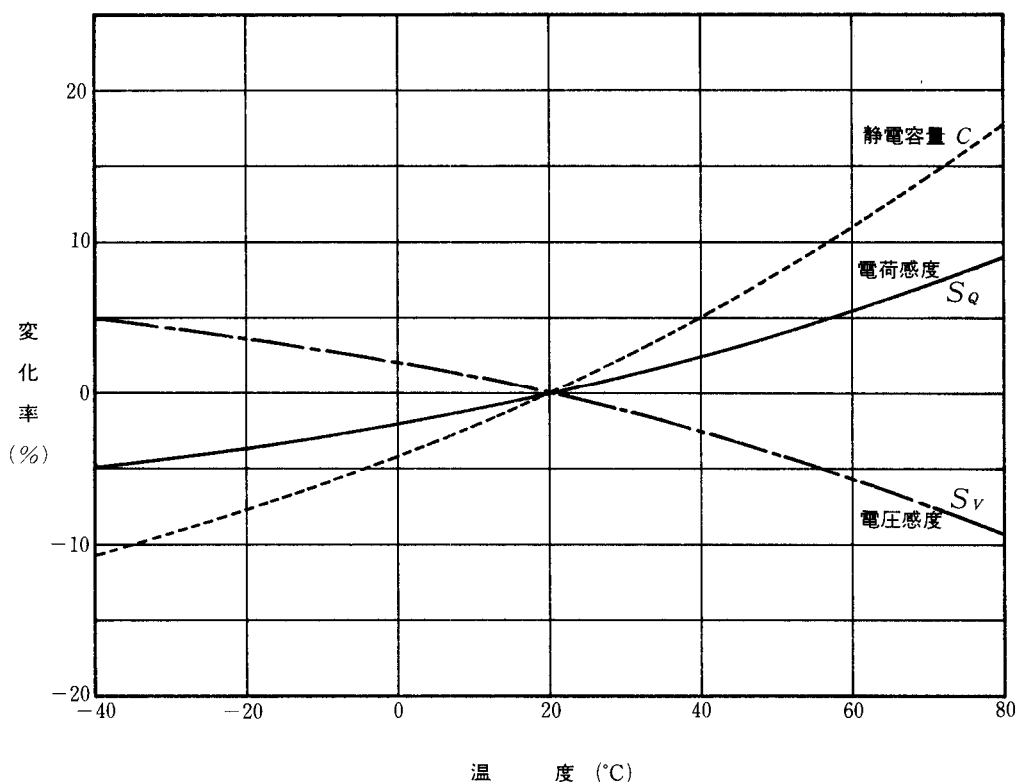


図 8.2.1 圧電型加速度ピックアップの温度特性例

このように温度によって感度が変わるのは圧電体の圧電定数が温度によって変化するためで、電気的にも機械的にも温度関数のパラメータが複雑な変化をして重畳し合い最終的に感度の変化となって現われているものです。また、温度係数と感度の間には密接な関係があり、一般に温度係数を低くおさえると感度も低くなるという傾向があります。

### (8-3) 温度トランジェントによるノイズ

加速度ピックアップの周囲温度が、風や光、赤外線などによって急激に変化するとノイズが発生します。

圧電体の結晶は、電界も応力も加わらない状態でもはじめから分極しています。これを自発分極と呼び通常  $P_s$  の記号をもって表わします。この  $P_s$  を持つ結晶は、温度により熱振動状態が変わ

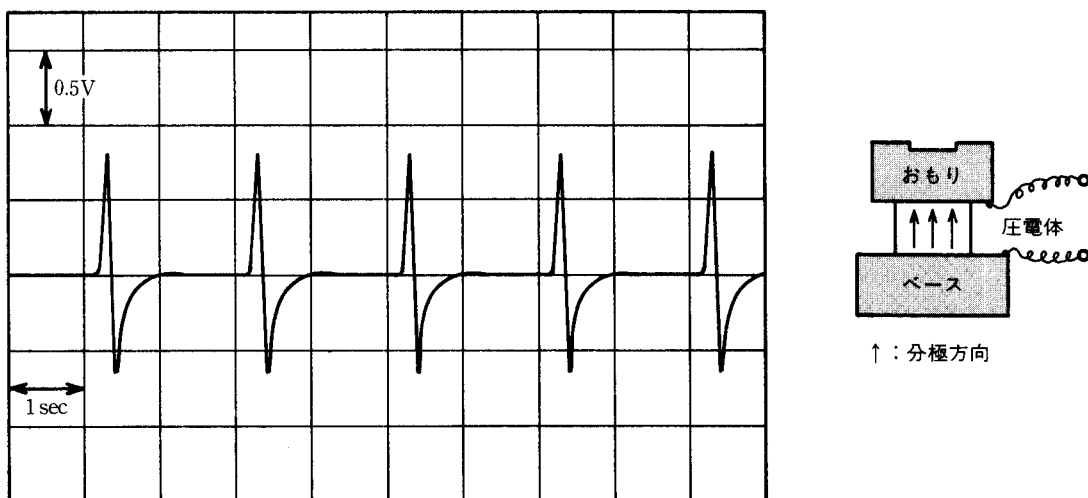


図 8.3.1 (a) 圧縮モードのバイロ電気出力例

ったり熱膨張により結晶の大きさが変化するため $P_s$ も変化します。つまり $P_s$ は温度の関数で結晶の温度変化分が $P_s$ の変化分となって結晶の表面に現われ電位差を生じます(正効果)。また逆に電界を加えるとそれを打ち消すような温度変化を生じます(逆効果)。これらの現象をパイロ効果(焦電効果)と呼びます。

パイロ電気は、圧電体の分極方向に対し垂直の面に表われますので原理上、圧縮型は比較的影響を受けやすいことになります。その点シェア型は殆んど問題になりません。

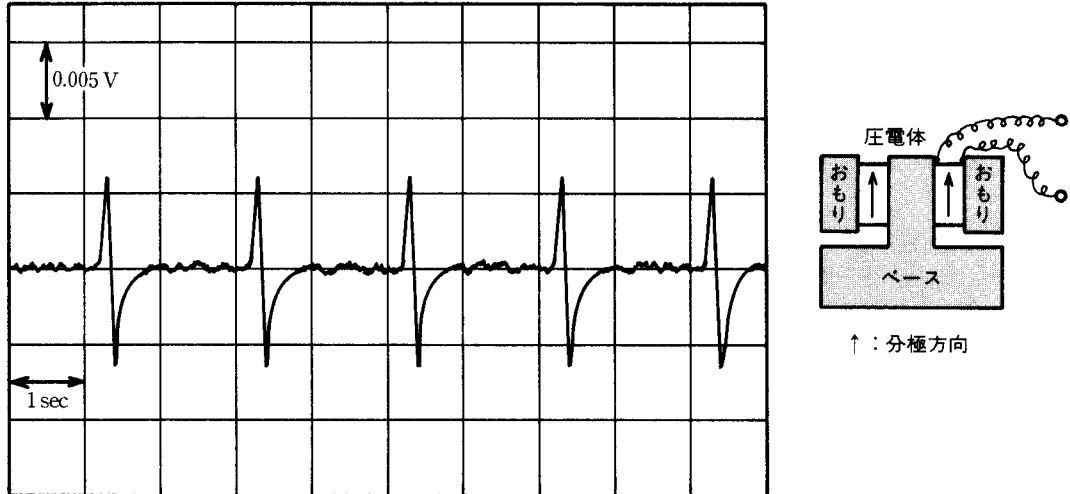


図 8.3.1 (b) シェアモードのパイロ電気出力例

図8、3、1は同一形状の圧縮モードとシェアモードの圧電体に急激な温度変化を強制的に与えた場合のパイロ電気出力例です。この場合ですと圧縮型にくらべシェア型は $-40\text{dB}$ 以上もレベルの低いことがわかります。

一般にパイロ電気の周波数成分は数Hz以下ですから、数Hzのカットオフ周波数を持つハイパスフィルターで減衰させることができます。

#### (8-4) 湿度の影響

当社の加速度ピックアップはステンレス製ケースにエポキシ接着のシールが施されていますので少々の湿気では影響を受けません。

湿度が高い場合は、コネクタ部で絶縁抵抗が低下しますので防水処理されたケーブル直出し型を使用して下さい。

当社製F51Tは、これらの条件を考慮して設計されていますので、湿度の高い環境や水のかかる場所で使用する場合に適しています。(JIS-C-5031に準拠)

#### (8-5) 音響感度

音響と振動は根本的には同じものであり、音響エネルギーは、物体を加振し、振動している物体からは音響エネルギーが周囲の空气中を伝播していきます。加速度ピックアップも音場の中に置かれるとケースが励振されて音響ノイズとしての出力が出ます。その振幅の大きさは、それぞれのピックアップの内部構造によって異なりますが、当社製P51の場合 $130\text{dB}$ の音場中で $1/1,000\text{g}$ 程度ですから一般振動計測では、殆んど問題になりません。

#### (8-6) 電磁場の影響

圧電体は電場にも磁場にも何ら感度を有していませんので、加速度ピックアップの場合も影響は受けません。

交番磁界中に置かれた場合、ステンレスケース（SUS303orSUS304）の中で稀に磁性を持ったものがあり、ケースが励振されてわずかに出力の出る場合もありますが、一般的な振動計測の場合質量の大きい振動体に固定されますので、その励振の影響も殆んど無くなります。

強力な交番電界中に置かれた場合は、ケーブルがグラウンドループのノイズを拾う場合がありますので、絶縁スタッドを使用するか、平衡出力型（差動出力型）のピックアップを使用する必要があります。特に強力な電磁場内で計測する場合は、計測器本体にノイズが混入する場合もあり、その計測システム全体のシールドを考える必要があります。

## 9. 感度校正

### (9-1) 絶対校正〔干渉法〕

加速度ピックアップの感度は1 g 当りの出力電圧すなわち mV/g で表わされますが、絶対校正を行なう場合は、加振器の発生する加速度 (g) を正確に計測する必要があります。加振周波数を一定にした場合は加振テーブルの変位を計測することによりそのときの加速度を求めることができます。加振周波数やピックアップの出力電圧は比較的正確に測定することができますが、加振テーブルの変位は数 $\mu\text{m}$ 程度の微小振幅のため顕微鏡を使用しても人為的誤差などが含まれるため、十分な精度が得られません。そのため、この微小振幅を精度よく計測するためには、レーザー光を使用したマイケルソン干渉計を使用します。図9.1.1はレーザー干渉法による加速度ピックアップの絶対校正を示したブロックダイアグラムです。

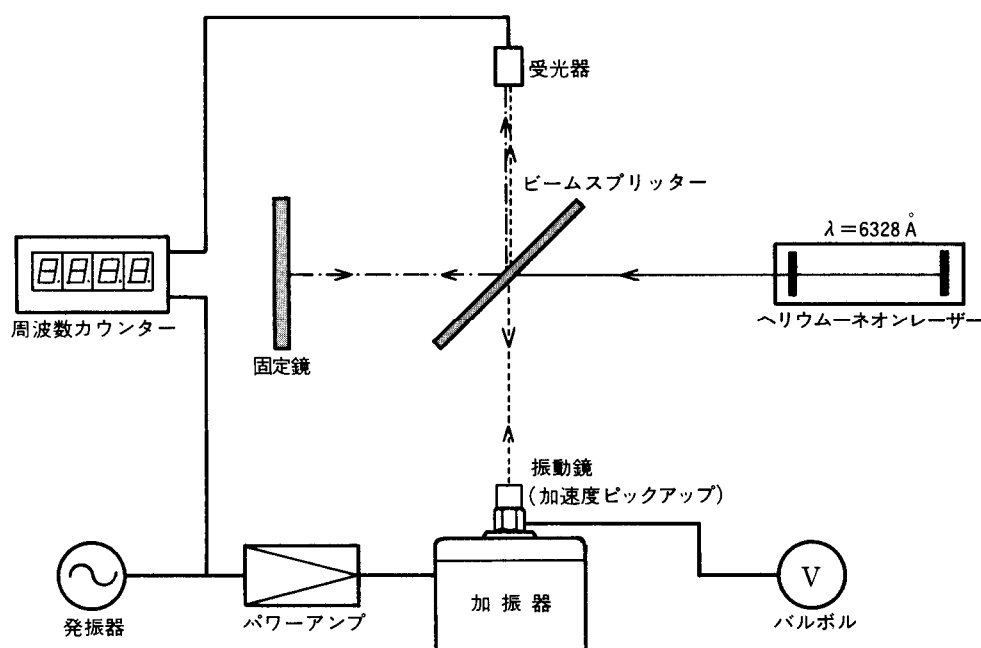


図 9.1.1 レーザー干渉法による絶対校正

まず、レーザー発振器から出た光はビームスプリッターによって2方向に分けられます。ビームスプリッターを透過した光は固定鏡で反射されて受光器に入ります。もう一方は、振動テーブル上の振動鏡で反射され受光器に入りますが、そのときに両者の間で干渉が起こります。この干渉光は、レーザー光の波長の1/2ごとに最大となりますので、加振テーブルの振幅は、テーブルが1周期動くときに含まれる干渉縞の数すなわち、干渉縞の周波数と加振テーブルの周波数の比から求めることができます。なお、光源としてのレーザー光は一般にヘリウム-ネオンレーザー ( $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ ) を用います。

### (9-2) 比較法

絶対校正によって校正された加速度ピックアップを基準ピックアップとして、その出力と供試ピックアップの出力を比較することによって校正する方法で、比較的手軽に行なえるため一般の加速度ピックアップはほとんどこの方法で校正されています。この方法で特に注意することは、基準ピックアップと供試ピックアップを同じ動きにしないと精度のよい校正ができませんので両



者はできる限りしっかりと固定する必要があります。図9、1、2は比較法による校正を表わしたブロックダイアグラムです。

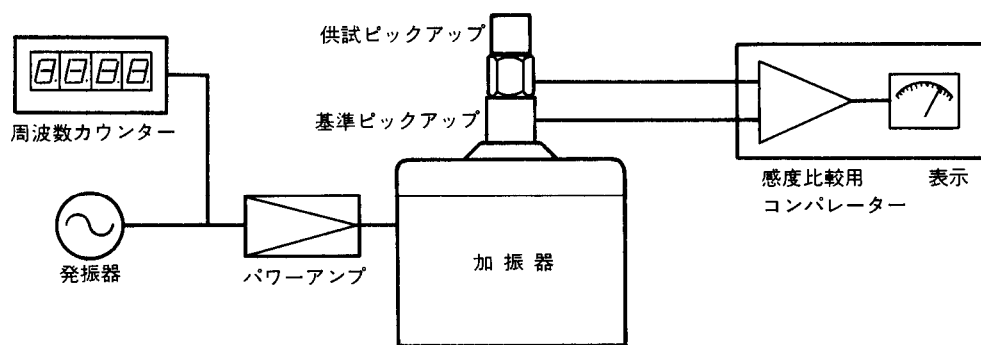


図 9.1.2 比較法による校正

## 10. 加速度ピックアップの適正な使い方

### (10-1) 加速度ピックアップの構造と用途

圧電型加速度ピックアップは、他の方式に比べ、感度の割に共振周波数を高くすることができるため、現在各方面で多く使用されています。その構造は大きく分けて3つに分類されます。

- (a) 圧縮型は、ベースとおもりの間に圧電体がネジ止めされた構造になっています。機械的強度は極めて強いので相当高い衝撃力の計測も可能です。圧電体の分極方向と電気出力を取り出す方向が同じためにパイロ電気の影響を受けやすいのが欠点です。しかし、パイロ電気によるノイズの周波数成分は極く低周波（数Hz以下）ですからローカットフィルターで除くことができます。

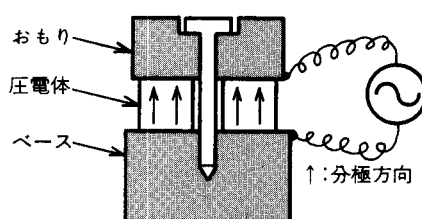


図10.1.1 圧縮型

圧縮型は、感度に対して共振周波数を高くできますので、一般振動計測はもちろん高速回転機器やパイプラインの漏洩検出など高周波振動の計測にも適します。

- (b) シェア型（せん断型）は圧電体の分極方向と電気出力の方向とが $90^\circ$ に直交しているためパイロ電気による出力はほとんどありません。（パイロ電気は分極方向に対して垂直面上に現われます。）構造は、図10、1、2のように圧電体の両電極面にズレが起こるようになっています。

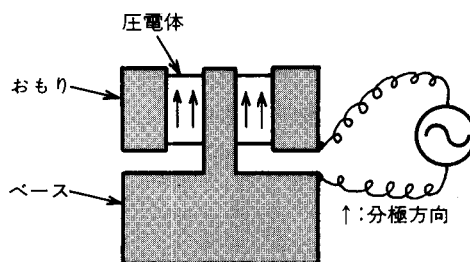


図10.1.2 シェア型

原理上、機械的強度はあまり強くありませんが、おもりの固定方法を工夫すれば相当高い加速度まで計測することができます。パイロ電気によるノイズレベルが低いので低周波振動の計測や温度変化の激しい場所での計測に有利です。またベースストレイン感度<sup>(1)</sup>が小さいというのも大きな特長です。

注(1) 加速度ピックアップのベースひずみを内部の圧電体が拾ってしまう現象で、ピックアップの構造や機種、取り付け状態などによって変わります。シェア型は、原理上この影響を受けにくくなっています。

(c) ベンディング型は、セラミックバイモルフの原理と同じで圧電体の横効果を利用したものです。金属板に圧電体の薄い板を接着しそれを曲げると圧電体に横方向の応力が加わり曲げに比例した出力が取り出せます。

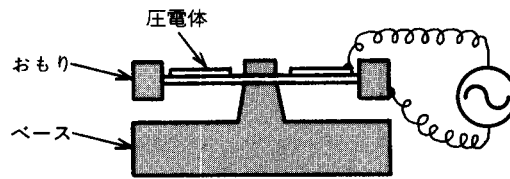


図10.1.3 ベンディング型

構造的には、用途や仕様によって中心固定・両端固定・片端固定などがありますが、このタイプは、共振周波数はあまり高くありません。しかし低周波域で高感度にできますので、地震や地盤振動、ダムや発電所など大型構造物の微振動計測に適します。

以下に、各タイプの長所をあげておきますので用途に応じて選択して下さい。

(圧縮型)

- 機械的強度が強い。(最大使用加速度が大きい。)
- 共振周波数に対して感度が高い。(高域まで計測可能)

(シェア型)

- 熱雑音が小さい。
- ベースストレイン感度が小さい。
- 本体重量に比較して高感度のものが作れる。

(ベンディング型)

- 低周波範囲で非常に高感度のものが作れる。
- 軽量のものが作れる。

## (10-2) 取り付け方

加速度ピックアップを固定するうえで最も重要なことは、ベース底面と振動体表面を強く完全に密着させるということです。そのために、加速度ピックアップのベース底面は上仕上げ面になっており、その中心にはピックアップ固定用のネジ穴があいています。振動体表面をできるだけフラットに研きさらに接触面にシリコンオイルやグリスを塗り固定ネジを使ってスパナでしっかり締付け固定することが最も理想的です。固定状態の良し悪しは特に高域周波数特性に大きな影響を与えます。(4-4 接触共振周波数の項参照)

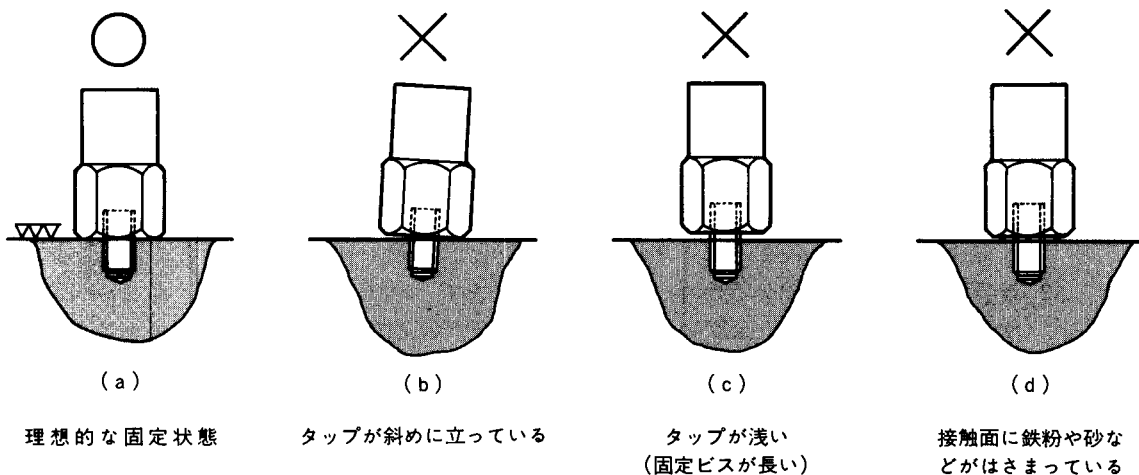


図10.2.1 加速度ピックアップの取り付け方

しかし、実際現場でこのような条件を揃えることは不可能な場合が多く、たとえヤスリなどで表面を研いてもフラットな面にすることはむずかしいものです。そのような場合にシリコンオイルやグリスは有効で、少々デコボコ面でもそのすき間に浸透し取り付け剛性や密着度を上げることができます。

呼び径	標準締付トルク
M 3	6 [kg-cm]
M 4	16
M 5	30
M 6	50
M 8	120
材質：S45C 普通鋼	

表10.2.1 参考締付トルク

次に各種のオプションパーツを使って取り付ける場合について述べます。

〔絶縁スタッド〕

絶縁スタッドは、ピックアップのケースをGNDから絶縁し、グラウンドループによるノイズの混入を防ぐためのものです。

取り付け上の注意点はピックアップの場合と同様ですが取り付け順序は、まずピックアップに絶縁スタッドを取り付け、次いで絶縁スタッドの六角部を使って振動体に締付け固定して下さい。その際各接触面にシリコンオイルを塗布するとよいでしょう。なお締付トルクは、表10.2.1を参照して下さい。

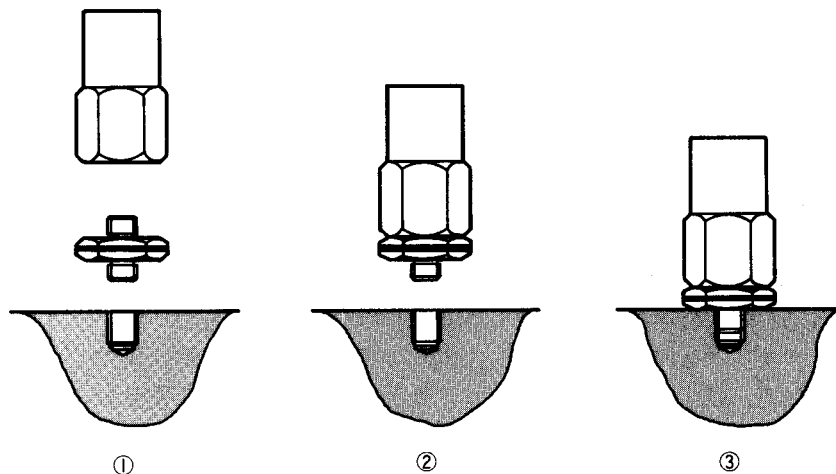


図10.2.2 絶縁スタッドの取り付け方

〔マグネットホルダー〕

振動体が磁石に吸着する金属の場合は、マグネットホルダーを使って固定することができます。マグネットホルダーは振動体との接触状況によって高域特性が大巾に変化しますので振動体表面をできるだけフラットに研く必要があります。シリコンオイルを塗布し密着度をよくすれば、ネジ固定と殆んど同等の高域特性を得ることもできます。(図4、4、4参照) なお、ピックアップの重量によっても高域特性は変化します。

〔袋ナット〕

振動体にタップが立てられない場合や磁石に吸着しない場合は、接着剤や両面接着テープを使用します。しかし、加速度ピックアップのベース底面に直接、接着剤を塗布することは取り外す時にベース底面をいためたり、固定ネジの中で固まったりして後の計測に悪影響を及ぼすため、あまりおすすめできません。その場合には袋ナットを使用します。このナットは、片方だけ固定ネジが切っており、もう一方の面は平らになっているため、特に接着剤を使用して固定する場合に便利です。また、このナットは取り付けに便利のように追加工することもできます。

### (10-3) ローノイズケーブル

圧電型加速度ピックアップは出力インピーダンスが非常に高いため、ケーブルが機械的な曲げやねじれの変形を受けたときに生ずる静電的ノイズの影響を受けます。

同軸ケーブルが機械的に曲げられたり、ねじられたりすると、図10.3.1のようにシールド被覆の導体と絶縁体が分離し、局部的にコンデンサーを形成します。そこへ摩擦により生じた電荷がチャージされ、この電荷が導体を通してチャージアンプの入力部で放電すると、ノイズになります。これをトリボ効果と呼びます。

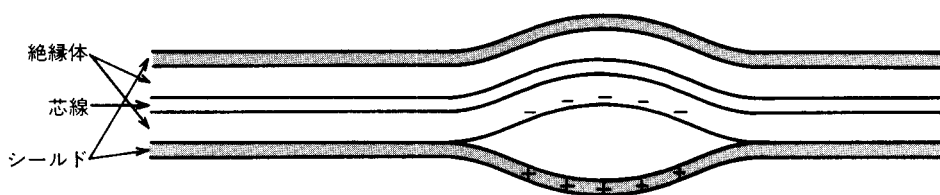


図10.3.1 同軸ケーブルのトリボ効果

この影響を少なくするためには、局部的コンデンサを形成しないように絶縁体表面に導電性被膜処理を施したローノイズケーブルを使う必要があります。このケーブルは、たとえ機械的に導体と絶縁体が分離しても電気的にはコンデンサを形成しませんのでトリボ効果もほとんど発生しないようになっています。しかし、実際に振動計測を行なう場合は、ローノイズケーブルを使用しても機械的に動かないように固定することがたいせつです。

なお、プリアンプ内蔵型加速度ピックアップを使用する場合は出力インピーダンスが低い(300Ω以下)ので、必ずしもローノイズケーブルを使う必要はありません。

### (10-4) 低周波低レベル振動計測

低周波でしかも低レベルの振動を計測する場合は特に計測システム全体で高S/N比を確保する必要があります。そのためには加速度ピックアップの感度はできるだけ高いものを使用して下さい。(P52S or P13S etc) 低域遮断周波数は、計測目的によって決めて下さい。(4-2項参照) 必要以上に応答範囲が低周波まで延びていると、急激な温度変化によるパイロ電気のノイズが入る場合があり、S/N比を悪化させる原因となります。(8-3項参照) 温度変化の激しい場所で数Hz以下まで計測する必要がある場合はシェア型の加速度ピックアップを使用して下さい。

### (10-5) 衝撃および過渡振動の計測

衝撃振動を計測する場合は、加速度ピックアップを含めた計測システムの過渡応答特性が重要になってきます。衝撃周波数が低い場合、つまりパルス巾が大きくなるとゼロシフトによる誤差が目立ってきます。これはシステムの低域特性に依存します。(7-1項参照) また衝撃周波数が高くなるとリングングによる誤差が大きくなってきます。これは、ピックアップの高域特性に依存します。(7-2項参照)

ゼロシフトは、その波形の実効値には影響しませんがピーク値を計測する場合は考慮に入れる必要があります。特に積分器を通して速度や変位を求める場合は注意が必要です。

実際に衝撃計測を行なう場合どの程度のシステム時定数或は固有共振周波数が必要であるか、表10、5、1、表10、5、2及び表10、5、3に示しておきますので参考にして下さい。

<ゼロシフトによる誤差>

#### 半正弦波

パルス巾 $T$	パルス周波数 $f_p$	誤差5%以内		誤差2%以内	
		時定数 $\tau$	遮断周波数 $f_c$	時定数 $\tau$	遮断周波数 $f_c$
1 msec	500 Hz	$\geq 0.007$ sec	$\leq 140$ Hz	$\geq 0.016$ sec	$\leq 63$ Hz
10 msec	50 Hz	$\geq 0.07$ sec	$\leq 14$ Hz	$\geq 0.16$ sec	$\leq 6.3$ Hz
25 msec	20 Hz	$\geq 0.18$ sec	$\leq 5.7$ Hz	$\geq 0.4$ sec	$\leq 2.5$ Hz
50 msec	10 Hz	$\geq 0.35$ sec	$\leq 2.9$ Hz	$\geq 0.8$ sec	$\leq 1.3$ Hz
100 msec	5 Hz	$\geq 0.7$ sec	$\leq 1.4$ Hz	$\geq 1.6$ sec	$\leq 0.63$ Hz
200 msec	2.5 Hz	$\geq 1.4$ sec	$\leq 0.71$ Hz	$\geq 3.2$ sec	$\leq 0.31$ Hz
備考		$\tau/T \geq 7$		$\tau/T \geq 16$	

表10.5.1

#### 単発矩形波

パルス巾 $T$	パルス周波数 $f_p$	誤差5%以内		誤差2%以内	
		時定数 $\tau$	遮断周波数 $f_c$	時定数 $\tau$	遮断周波数 $f_c$
1 msec	500 Hz	$\geq 0.02$ sec	$\leq 50$ Hz	$\geq 0.05$ sec	$\leq 20$ Hz
10 msec	50 Hz	$\geq 0.2$ sec	$\leq 5$ Hz	$\geq 0.5$ sec	$\leq 2$ Hz
25 msec	20 Hz	$\geq 0.5$ sec	$\leq 2$ Hz	$\geq 1.3$ sec	$\leq 0.8$ Hz
50 msec	10 Hz	$\geq 1$ sec	$\leq 1$ Hz	$\geq 2.5$ sec	$\leq 0.4$ Hz
100 msec	5 Hz	$\geq 2$ sec	$\leq 0.5$ Hz	$\geq 5$ sec	$\leq 0.2$ Hz
200 msec	2.5 Hz	$\geq 4$ sec	$\leq 0.25$ Hz	$\geq 10$ sec	$\leq 0.1$ Hz
備考		$\tau/T \geq 20$		$\tau/T \geq 50$	

表10.5.2

<リングングによる誤差>

半正弦波及び半三角波

但し加速度ピックアップの減衰比を  $h \approx 0$  とする。

パルス巾 $T$	パルス周波数 $f_p$	誤差10%以内		誤差5%以内	
		ピックアップ固有周期 $T_n$	固有共振周波数 $f_n$	ピックアップ固有周期 $T_n$	固有共振周波数 $f_n$
200 $\mu$ sec	2.5 KHz	$\leq 40$ $\mu$ sec	$\geq 25$ KHz	$\leq 20$ $\mu$ sec	$\geq 50$ KHz
150 $\mu$ sec	3.3 KHz	$\leq 30$ $\mu$ sec	$\geq 33$ KHz	$\leq 15$ $\mu$ sec	$\geq 67$ KHz
100 $\mu$ sec	5 KHz	$\leq 20$ $\mu$ sec	$\geq 50$ KHz	$\leq 10$ $\mu$ sec	$\geq 100$ KHz
75 $\mu$ sec	6.7 KHz	$\leq 15$ $\mu$ sec	$\geq 67$ KHz	$\leq 7.5$ $\mu$ sec	$\geq 133$ KHz
50 $\mu$ sec	10 KHz	$\leq 10$ $\mu$ sec	$\geq 100$ KHz	$\leq 5$ $\mu$ sec	$\geq 200$ KHz
備考		$T_n \leq T/5$		$T_n \leq T/10$	

表10.5.3

## (10-6) 振動体が軽い場合

圧電型加速度ピックアップは、その原理上接触型振動センサーとして分類されます。したがって、振動計測を行なう場合常にピックアップの動的質量が加わった状態で計測していることになります。ピックアップの重量はせいぜい数10grですから一般振動計測では問題になりません。しかし計測しようとする振動体の重量が軽い場合はピックアップの重量が加わることによって対象物の振動モードを変化させる場合があります。特に薄く小さい振動板の共振特性を測定するような場合は、ピックアップを付加することによって共振周波数が低下しますので注意が必要です。(式10.6.2) その場合には小型軽量のピックアップを使う必要があります。一般的な目安としてピックアップの自重は試験対象物の重量の少なくとも1/10以下でなくてはなりません。

$$\alpha_p = \alpha_0 \frac{m_0}{m_0 + m_p} \quad (10.6.1)$$

$$f_p = f_0 \sqrt{\frac{m_0}{m_0 + m_p}} \quad (10.6.2)$$

但し	$\alpha_p$ ：	加速度ピックアップを付けたときの試料の加速度	$m_0$ ：	試料の有効質量 (mg)
	$f_p$ ：	共振周波数	$m_p$ ：	ピックアップの有効質量 (mg)
	$\alpha_0$ ：	加速度ピックアップを付けないときの試料の加速度		
	$f_0$ ：	共振周波数		

## (10-7) グランドループ

グラントループによるハムノイズは計測システムのアースが2点以上でなされている場合に発生します。これは、各アース間に若干の電位差があるために計測システム内にアース電流が循環するというものです。

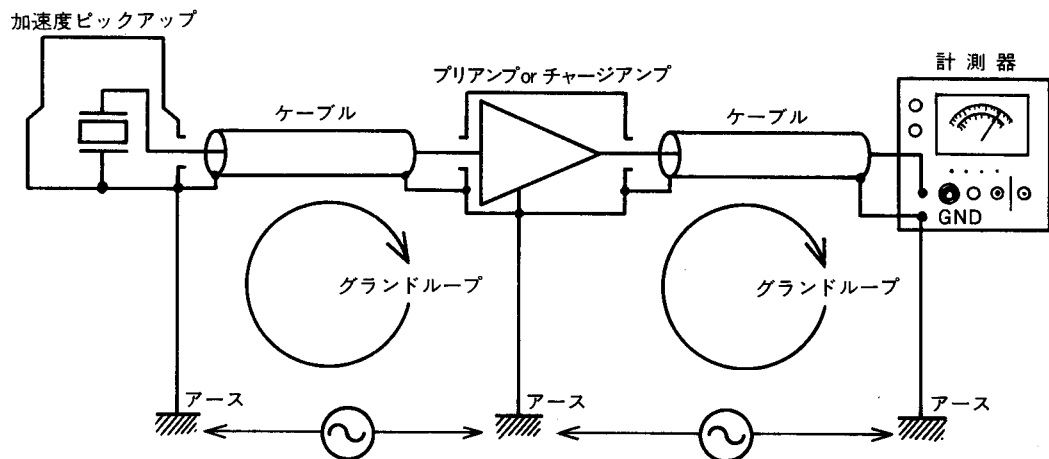


図10.7.1 多点アースによるグラントループ

これを防ぐにはシステム全体を1点でアースすることです。そのためには、加速度ピックアップに絶縁型のものを使用するか、絶縁スタッド或は絶縁マグネットホルダなどを使用するとよいでしょう。システム全体のアースは最終段の計測器の入力部グラントから取るのが最も理想的です。マルチチャンネルの場合も全システムで1点の共通アースを取るようになって下さい。そのためには、ピックアップだけでなくアンプや計測器もアースから浮かしておく必要があります。

## ＜参考文献＞

- (1) 古川英一著：『振動および衝撃測定』 誠文堂新光社
- (2) Brüel & Kjær：『PIEZOELECTRIC ACCELEROMETER AND VIBRATION PREAMPLIFIER HANDBOOK』
- (3) 有山兼孝，三宅静雄，茅 誠司，武藤俊之助，小谷正雄，永宮健夫編集：『結晶物理学』 共立出版株式会社
- (4) 実吉純一，菊池喜充，能本乙彦監修：『超音波技術便覧』 日刊工業新聞社
- (5) 電子材料工業会監修：『圧電セラミックスとその応用』 電波新聞社
- (6) エレセラ出版委員会編：『セラミックセンサ』 技献社
- (7) 村田愛祐著：『工学のための初等ラプラス変換』 オーム社



 株式会社 **富士セラミックス**

<http://www.fujicera.co.jp/>

〒418-0111 静岡県富士宮市山宮2320-11

TEL 0544 - 58 - 4651

FAX 0544 - 58 - 1413