



106

音 響 振 動	テクニカルノート
---------	----------

機械振動の測定

リオン株式会社

目 次

機械振動の測定	1
1. 振動の定義および測定量	1
1.1 機械振動	1
1.2 正弦振動	1
1.3 測定目的による振動量の選択	4
1.4 振動量の表示	5
1.5 振動量のデシベル表示	6
2. 測定方法の選択	7
3. 圧電式加速度ピックアップ	10
3.1 動作原理	10
3.2 圧電式加速度ピックアップの構造	11
3.3 加速度ピックアップの感度表示	12
3.4 アンプ内蔵ピックアップ	13
3.5 TEDS ピックアップ	13
3.6 加速度ピックアップの選択	15
3.7 加速度ピックアップの質量	16
3.8 加速度ピックアップの取り付け方法	18
4. 振動測定器	24
4.1 振動計	24
4.2 周波数分析器	28
4.3 記録機器	37
5. 機械振動の評価	38
5.1 振動シビアリティ	38
5.2 振動シビアリティ測定器	38
5.3 振動シビアリティによる評価	39
5.4 ISO 10816 シリーズによる振動評価	40
附 録	44
1. 正弦振動の合成	44
1.1 同じ振動数の正弦振動の合成	44
1.2 異なる振動数の正弦振動の合成	44
1.3 うなり	44

2.	1 自由度系.....	45
3.	振動ピックアップの原理.....	46
4.	1 自由度系の固有振動数	47
5.	減衰のある自由振動.....	49
6.	強制振動の性質.....	50
7.	減衰のない強制振動.....	50
8.	減衰のある強制振動.....	51
9.	振動伝達率	51

機械振動の測定

機械振動の測定は、きわめて広い分野にわたって行われ、その測定方法も多種多様である。現在の測定手法は、非常に高度なものまで実用化され、それぞれの分野で利用されている。

本ノートは、一般的な機械振動の測定のための基本的事項について、入門的な解説をするものである。

1. 振動の定義および測定量

1.1 機械振動

振動とは「機械系の運動または位置を表す量の大きさが、ある平均値または基準値よりも大きい状態と小さい状態とを交互に繰り返す時間的変化」であることが JIS B 0153(機械振動・衝撃用語)で定義されている。

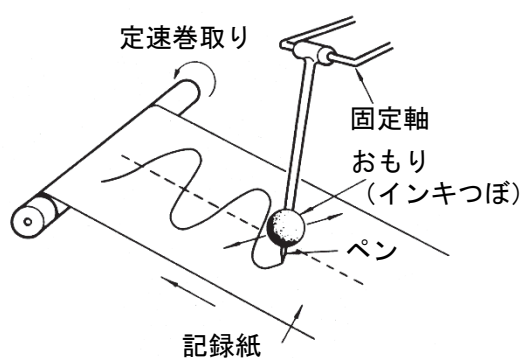
1.2 正弦振動

最も単純な運動で周期的に調和運動をする単振動は「時間の正弦関数で表される運動」と定義され、一般には正弦振動といわれる。

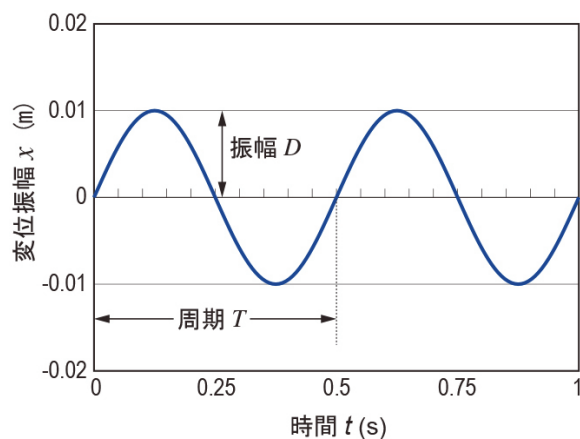
図 1.1(1)のような先端にペンがついたインキつぼをおもりにした振子について考えてみる。ただし、この振子の支持部は摩擦が少なく、かつ十分な長さをもつ振子とする。

振子を少し斜めにずらして手を放すと同時に記録紙を一定速度で送ると、図 1.1(2)のような正弦波形が記録されていく。

このとき 1 往復に要した時間を周期といい、1 秒の間に往復した回数を振動数という。つまり、周期 T は「振動数の逆数」であり、振動数 f は「単位時間当たりのサイクル数」である。



(1) 振子の運動



(2) 正弦振動

図 1.1 振子の運動

振動数は周波数ともいう(音響工学の分野では周波数を用いる)。

$$T = \frac{1}{f} \quad [\text{s}] \quad (1.1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (1.2)$$

時間 t (s) における静止点からのおもりの移動距離を瞬時変位振幅 x (m)、最大移動距離を最大変位振幅 D (m) としたとき、正弦振動の変位は次式によって表せる。

$$x = D \sin \omega t \quad (1.3)$$

ここに、 ω は角振動数といい、物体が移動するときの角度に関する振動数 (rad/s) であり、周波数の 2π 倍である。

$$\omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}] \quad (1.4)$$

次に振子の速度を考える。速度は毎秒ごとの距離の変化であるが、振子の変位は時々刻々と変化する、そのような場合には変位 x (m) を微分することによって速度 v (m/s) が求まる。

$$v = \frac{dx}{dt} = D\omega \cos \omega t \quad (1.5)$$

さらに、毎秒ごとの速度の変化である加速度 a (m/s²) は、速度 v (m/s) を微分することによって求まる(つまり変位を2回微分する)。

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -D\omega^2 \sin \omega t \quad (1.6)$$

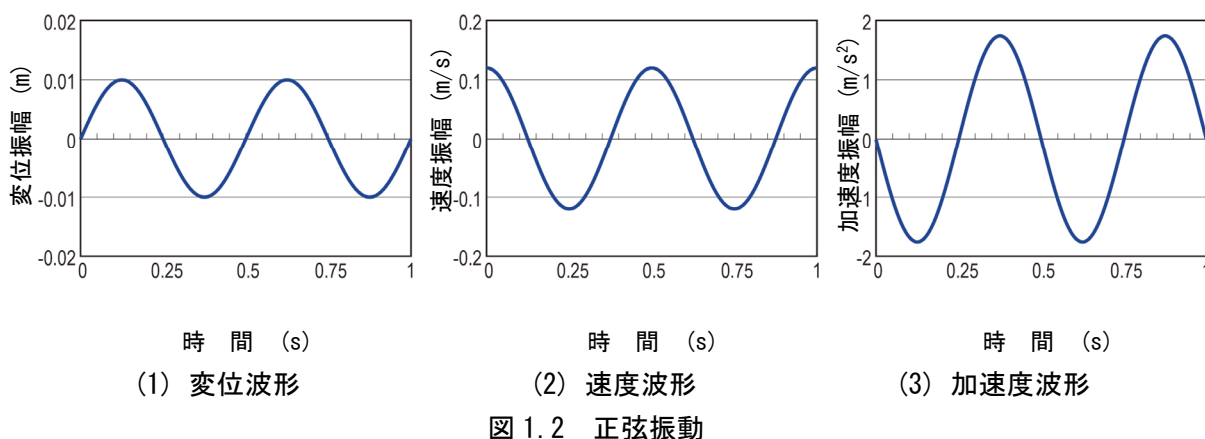
式(1.3)、(1.5)、(1.6)の $\sin \omega t$ あるいは $\cos \omega t$ は、正弦振動の位相の状態、すなわちこの正弦的变化が時刻 t において1サイクルの変化過程のどの位置にあるかを表す。 $\sin \omega t$ と $\cos \omega t$ の間には 90° の位相のずれがある。したがって、正弦振動の速度の位相は変位の位相より 90° 進み、加速度の位相は速度より 90° 、変位より 180° 進む。図 1.2 は、正弦振動の変位波形(最大変位 1 cm、振動数 2 Hz)に対する速度と加速度の波形を示す。縦軸の目盛は一桁ずつ大きい値になることに注意する。

一般的な振動測定では、振動波形の位相は無視して扱うので次のような関係式を用いる場合がある。

$$\begin{aligned} \text{変位振幅} \quad D &= \frac{V}{\omega} = \frac{V}{2\pi f} \\ &= \frac{A}{\omega^2} = \frac{A}{(2\pi f)^2} \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} \text{速度振幅} \quad V &= \omega D = 2\pi f D \\ V &= \frac{A}{\omega} = \frac{A}{2\pi f} \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \text{加速度振幅} \quad A &= \omega^2 D = (2\pi f)^2 D \\ &= \omega V = 2\pi f V \end{aligned} \quad (1.9)$$



振動量の基本単位は MKS 系 (SI 単位) だが、実用単位として表 1.1 のような単位が用いられている。ほかには、たとえばガル (Gal) は非 SI 単位であるが日本の計量法では重力加速度および地震に関わる振動加速度の計量に限定して使用を認めている。

なお、式 (1.7)、(1.8)、(1.9) は正弦振動の場合にだけ成り立ち、複合振動には直接適用できないことに注意する (複合振動の場合には周波数分析結果を用いれば換算が可能になる)。

表 1.1 振動量の単位記号

振動量	計量単位	補助計量単位 (実用単位)	瞬時値	最大振幅値
変位 Displacement	m	cm (1 cm = 10 ⁻² m) mm (1 mm = 10 ⁻³ m) μm (1 μm = 10 ⁻³ mm = 10 ⁻⁶ m)	$x(t) = D \sin(\omega t + \varphi_0)$	D
速度 Velocity	m/s	cm/s (1 cm/s = 10 ⁻² m/s) mm/s (1 mm/s = 10 ⁻³ m/s) kine (1 kine = 1 cm/s)	$v(t) = dx/dt$ $= D\omega \cos(\omega t + \varphi_0)$	$v = \omega D$
加速度 Acceleration	m/s ²	cm/s ² (1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²) Gal (1 Gal = 1 cm/s ²) G (1 G = 9.80665 m/s ²)	$a(t) = d^2x/dt^2$ $= -D\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0)$	$A = \omega^2 D$

ここまでは正弦振動の変位を基準として微分によって速度と加速度を導いたが、加速度を基準にする場合は、積分によって速度と変位を表すことができる。振動の変位、速度、加速度の関係を図 1.3 に示す。

$$a = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1.10)$$

$$v = \int a dt = -\frac{A}{\omega} \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1.11)$$

$$x = \iint a dt = -\frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1.12)$$

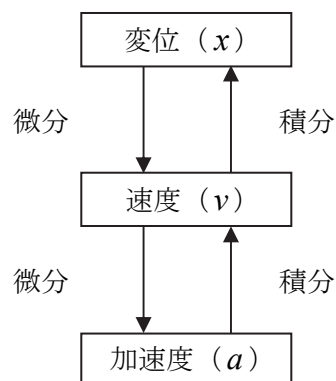


図 1.3 振動の変位、速度、加速度の関係

1.3 測定目的による振動量の選択

測定に用いる振動量は、測定目的によって選択されるが、規格、規則、仕様書などで測定すべき振動量が規定されていればそれらに従う。それ以外の場合は、表 1.2 のような目的・特長を利用して測定量を選択することになる。

表 1.2 測定量の選択

測定量	目的・特長
振動加速度	① 高振動数で大出力が得られる ② 力、負荷、応力の代わりに、力が加速度に比例する関係を利用できる場合 ③ 人体応答に関連する目的
振動速度	① 中域振動数で変位が小さすぎる場合 ② 機械の振動シビアリティ測定 ③ 固体音、音響放射に関連する測定
振動変位	① 変位の振幅が特に重要な場合(たとえば、接触の危険、加工精度)

同じ機械振動について、各振動量によって振動数分析をした結果を図 1.4 に示す。

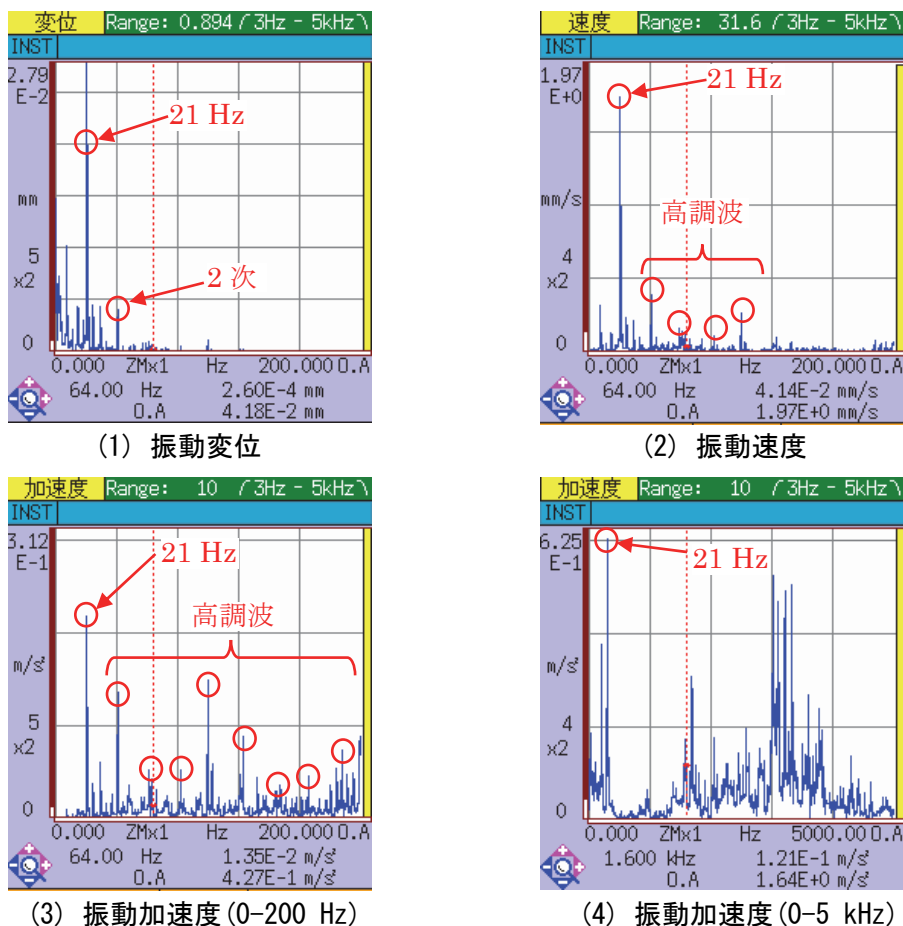


図 1.4 同じ振動の各振動量による分析結果

図 1.4 は送風機の軸受部の振動を加速度ピックアップで検出したものだが、(1)の振動変位は回転数に相当する基本振動数 21 Hz の 2 次までしか観測できない。(2)の振動速度は、5 次まで観測できる。(3)の振動加速度は 9 次まで観測でき、振動数範囲を拡大した (4) では 5 kHz までの成分が観測できる。

1.4 振動量の表示

図 1.1 (2) の正弦振動の振動量は振幅(ピーク値)によって表示されているが、この他に全振幅値(p-p 値: peak to peak) および実効値(rms 値: root mean square)による表示がある(表 1.3)。

従来は、ピーク値によって表示することが多かったが、ISO 規格で機械振動関係は振動速度実効値、人体振動関係は振動加速度実効値を主に用いることになっていることから、国内でも実効値による表示が一般化してきている。

正弦振動の場合は、表示がピーク値でも実効値でもよいが、非対称波形となる振動の場合は、ピーク値は任意の時間間隔における瞬時の最大値を示すのに対して、実効値はその時間内のエネルギー的な時間平均値なので全体の振動を表現できる。また、ピーク値は正弦振動以外では加算ができないが、実効値は正弦振動でなくても加算ができる。

周期 T における瞬時振幅 a の実効値 A_{rms} は次式によって定義される。

$$A_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2 dt} \quad (1.13)$$

実際には 1 周期では時間が短いので、ある程度長い時間を想定する。

ピーク値 A の正弦振動の実効値 A_{rms} は

$$A_{\text{rms}} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (1.14)$$

となる。

n 個の実効値 $A_{\text{rms}1}, A_{\text{rms}2}, \dots, A_{\text{rms}n}$ の和はそれぞれの二乗の和の平方根によって求まる。

$$A_{\text{rms}} = \sqrt{A_{\text{rms}1}^2 + A_{\text{rms}2}^2 + \dots + A_{\text{rms}n}^2} \quad (1.15)$$

表 1.3 正弦振動の振動量

ピーク値	得られた区間内の最大値(正弦振動では振幅に等しい)
実効値(rms 値)	瞬時値の自乗平均の平方根 正弦振動では、実効値=ピーク値 $\div\sqrt{2}\doteq 0.707\times$ ピーク値
全振幅値(p-p 値)	与えられた区間内の振動する量の極値間の代表差(極大値と極小値の差)のうち最大値

図 1.5 は正弦振動およびランダム振動の場合のピーク値、実効値、p-p 値などの関係を表している。ランダム振動の場合、実効値 $\times\sqrt{2}$ を等価ピーク値といい、同じ大きさの実効値をもつ正弦振動に換算した場合のピーク値に相当する。

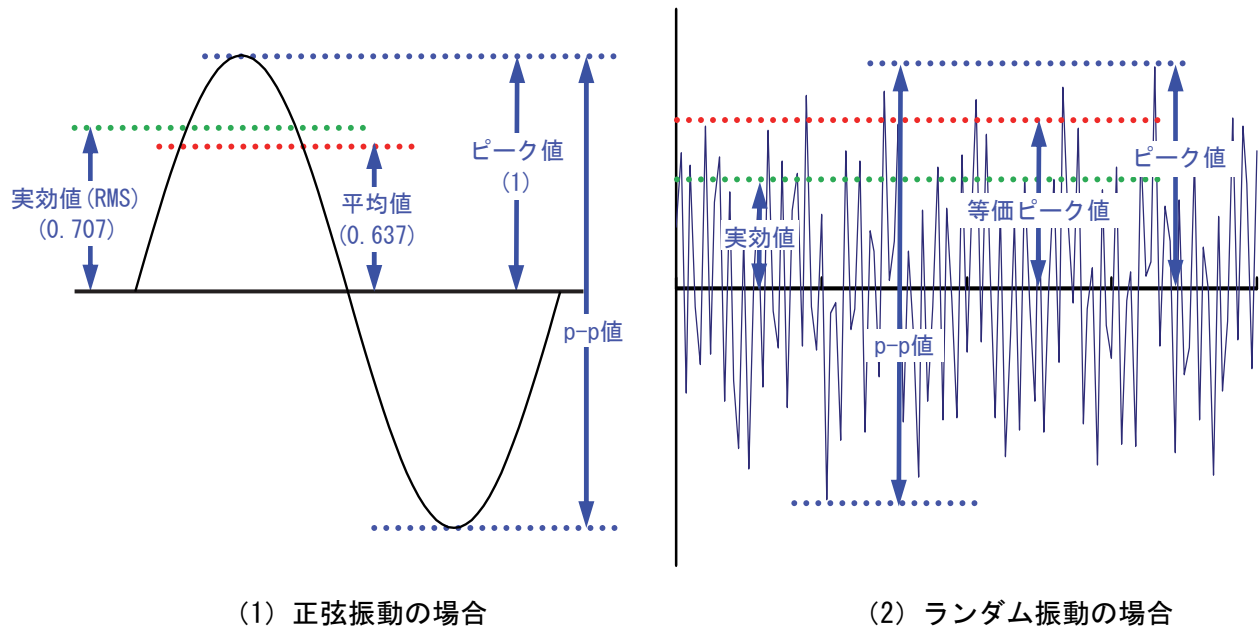


図 1.5 振動の大きさを表す量

1.5 振動量のデシベル表示

国内において、振動公害に関連する振動量は振動レベル(振動感覚補正加速度レベル)というデシベル(dB)によって表示される。デシベルは、基準値との比を対数で表す量であり、騒音の分野で広く用いられている。機械振動の場合には、デシベルで規定される規格はないが、大きな範囲の測定値をデシベルで扱うと簡便な場合がある。機械振動のデシベルを定義する場合には、上述の振動レベルを除いて、次のように定義することができる。

$$\text{振動加速度レベル} \quad L_a = 20 \log_{10} \frac{a}{a_0} \quad [\text{dB}] \quad (1.16)$$

ここに、 a は振動加速度実効値(m/s^2)、 a_0 は基準振動加速度(国内¹⁾では振動レベルとの関連から 10^{-5} m/s^2 、ISO²⁾では $10^{-6} \text{ m/s}^2 = 1\mu\text{m/s}^2$)である。

$$\text{振動速度レベル} \quad L_v = 20 \log_{10} \frac{v}{v_0} \quad [\text{dB}] \quad (1.17)$$

ここに、 v は振動速度実効値(m/s)、 v_0 は基準振動速度($10^{-9} \text{ m/s} = 10 \text{ nm/s}$)である。構造物の固体音のように構造物の振動と音響放射との関連を検討する測定^{2), 3)}では、基準振動速度を $5 \times 10^{-8} \text{ m/s} (= 50 \text{ nm/s})$ とする。これは振動面直前の空気音圧は振動面の振動速度に比例することから導かれる数値である。

備考

1) JIS C 1510 (振動レベル計)

2) ISO 1683: Acoustics – Preferred reference values for acoustical and vibratory levels

3) ISO/TR7849:1987 Acoustics – Estimation of airborne noise emitted by machinery using vibration measurement

これらのように定義をしなくても、任意のデシベル値を基準にしてプラス・マイナスの値、たとえば dB 目盛の測定器の最大目盛を 0 dB として $-X$ dB と読み取る場合がある。また、測定値が実効値のデシベル値 L_1, L_2, \dots, L_n のとき、その和 L は次式によって求められる。

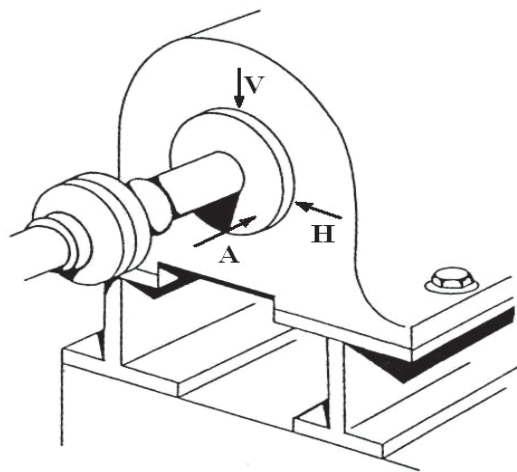
$$L = 10 \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}) \text{ [dB]} \quad (1.18)$$

2. 測定方法の選択

振動測定のための目的の一つは、機械が望ましい状態で動作しているかどうかを評価することである。

この場合、対象となる機械と測定する部位によって、あるいは要求される測定量によって、測定方法と使用する測定器は異なることが多い。

図 2.1 は故障診断を目的とした場合の測定量、測定方向の例である。アンバランスやミスアライメントの場合は振動速度、ベアリング異常の場合は振動加速度を測定する。測定方向は 3 方向を測定することが望ましいが、測定効率を考慮して、現象が現れやすい方向のみを測定する場合もある。



故障モード	振動速度	振動加速度
アンバランス	H 方向、V 方向	
ミスアライメント	H 方向、V 方向、A 方向	
ベアリング		H 方向または V 方向

図 2.1 故障診断における測定方向、測定量の例

機械振動の測定を計画するに際して、測定対象機械の種類、測定または評価の目的などによって全体計画を立案し、測定系を決める。機械振動の測定器の規格はほとんどないので、測定当事者が測定器の性能を設定し、適応する測定器を選定する。機械振動の測定に関する基本的な注意事項を図 2.2 に示す。

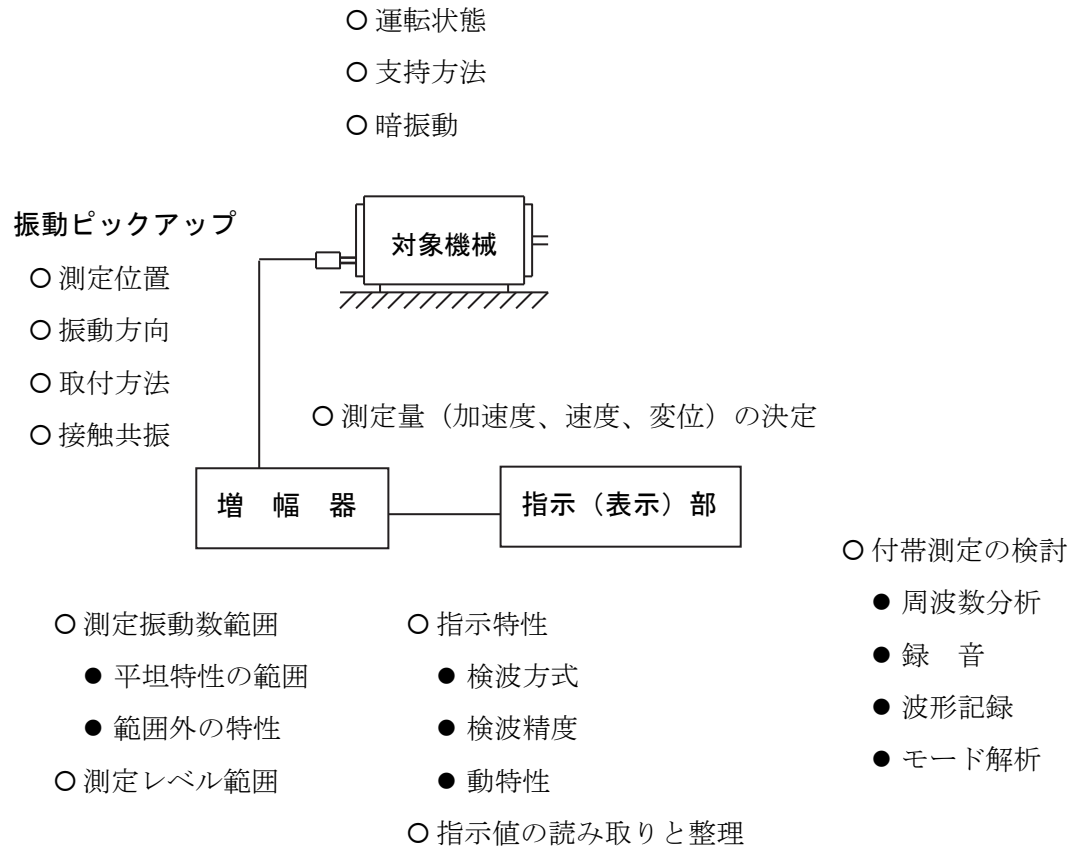


図 2.2 機械振動測定の基本注意事項

振動にはいろいろな現象があり、それらすべてを一つの形式の振動ピックアップで検出することは通常できない。このため多くの種類の振動ピックアップが開発され使用されてきた。ここでは、機械振動測定において一般に広く使用されている圧電式加速度ピックアップによる測定方法について示す。

測定量と加速度ピックアップが選定されれば、必然的に増幅器・指示部からなる振動計が決まる。次に、発生している振動の性質を知るために、その振動の振動数を調べる。それらの振動数成分と機械の振動発生と関係すると思われる回転数、負荷条件などと対比することによって、振動の状況を把握することが可能になる。その場合は振動計以外に周波数分析器が必要となる。

たとえば、**図 2.3** は 1860 rpm で回転して送風機の軸受の振動を周波数分析した結果である。回転数 1860 rpm に相当する周波数 31 Hz を確認することができる。振動速度のオーバーオール値は 4.55 mm/s と非常に大きく、高調波成分は少ないので、アンバランスの可能性があることが分かる。

図 2.4 は 1860 rpm で回転している別の送風機の実データである。回転数に相当する周波数 (31 Hz) の高調波成分が多数発生している。特に 2 次高調波が高い。このことからミスアライメントが発生していることが考えられる。

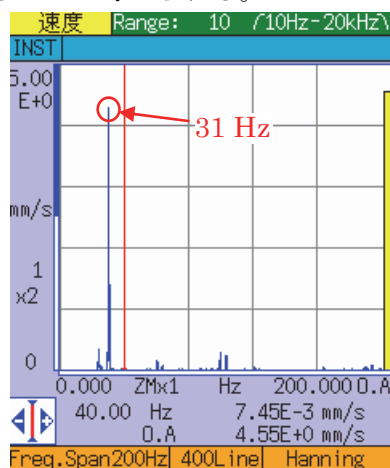


図 2.3 アンバランスの例(1860 rpm)

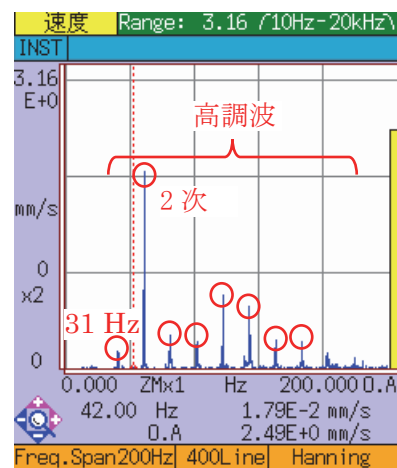


図 2.4 ミスアライメントの例(1860 rpm)

単純に振動数を知るだけでなく、機械構造の振動特性あるいは振動発生源の個所を究明するような場合には、その機械に既知の振動を与えて、それに対する機械の応答を測定し、その結果から機械の振動に関する性質を推定することもある。そのための測定方法としては、振動加振器によって機械に強制振動を与えて共振曲線を求める方法や、インパルスハンマによって衝撃を与えて入力(加振力)と出力(応答)から振動系の伝達関数を求める方法などがある。

3. 圧電式加速度ピックアップ

3.1 動作原理

圧電式加速度ピックアップ (piezoelectric acceleration pickup) は、圧電素子を用い、振動体に固定あるいは接触させて振動加速度を検出するものである。ある種の物質に機械ひずみを加えると電位差が生じるが、この現象を圧電効果といい、そのような現象を起こす物質を圧電材料という。圧電材料を利用した振動ピックアップは、その出力が振動加速度に比例するので加速度ピックアップと呼ばれる。加速度ピックアップに用いられる圧電素子の例としては、ジルコン・チタン酸鉛を主成分として分極されたセラミック (磁器) がある。

この圧電素子を利用する方法にはいくつかの方法があるが、最も簡単な構造で多く用いられている方式を図 3.1(1) に示す。この振動ピックアップの動きを図 3.1(2) および図 3.1(3) に示す。

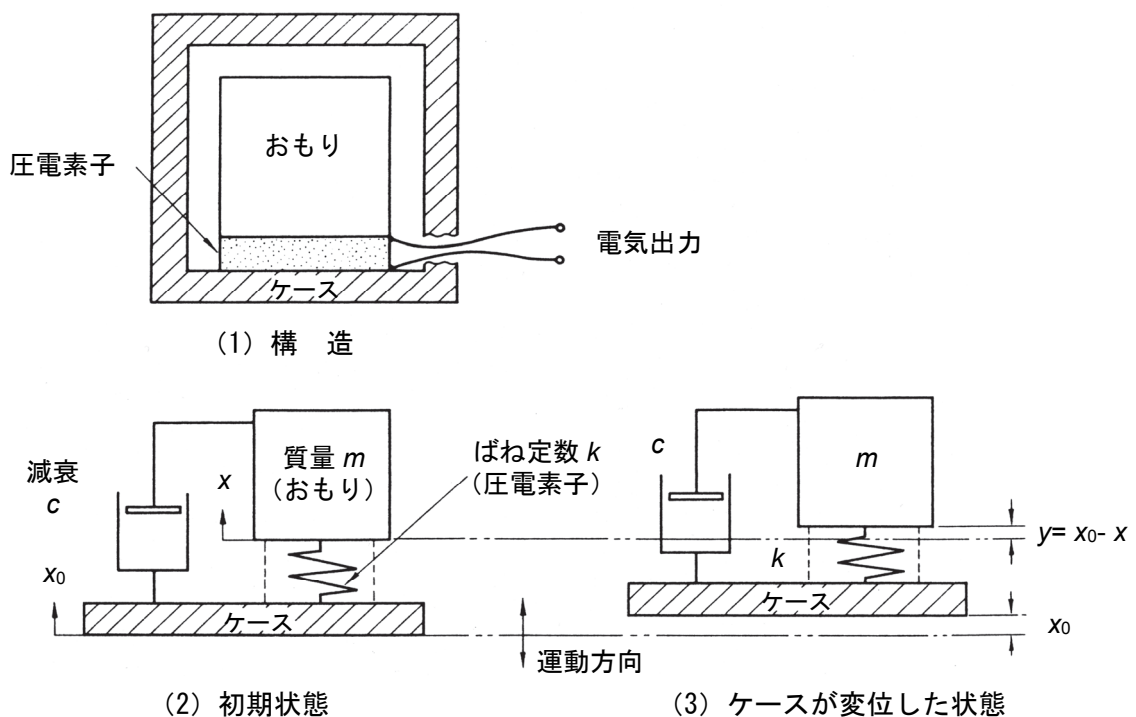


図 3.1 圧電式加速度ピックアップの動作原理

振動ピックアップは、一般に「質量(おもり)・ばね・減衰器(この系をサイズモ系という)」および「発電機構」からなる。圧電式加速度ピックアップの場合には、圧電素子がばねと発電機構となり、質量とケースの間の粘性減衰はダッシュポットで表されるが、この場合の減衰は非常に小さい。

図 3.1(2) において変位 x_0 の上向きの加速度が与えられたとき、ばねは(3)のように y だけ圧縮される。ケースに相対する質量の変位 y は、ケースの加速度、ばねの強さおよび質量で決まり、減衰は無視できる。質量とばね(サイズモ系)の固有振動数より十分低い振動数においては、この変位はケースの加速度に比例する。質量の慣性力は、ひずみに比例して電荷が生ずる圧電素子に機械的なひずみを与える。これにより、加速度に比例した電荷が圧電素子の電気端子に発生する。

3.2 圧電式加速度ピックアップの構造

圧電素子を用いるときは、素子に加える力の方向、および電荷の取り出し方によって、圧電素子の縦効果、せん断効果、あるいは横効果を利用する。

縦効果を利用する方式は圧縮型 (compression type) と呼ばれる。図 3.1 (1) のようにケースのベースの上に置かれた円板状の圧電素子の上に質量を固定する方式である。圧縮型の加速度ピックアップは構造が簡単で機械的な強度が大きくとれるので、機械振動、固体音などの測定に多く利用された。しかし圧縮型の難点は、瞬間的な周囲温度の変化に対する影響が出やすいことである。たとえば風が吹いたり、強い光が当たったりすると低振動数の雑音が発生し、低レベルの振動測定が困難になる。これはピックアップが急激な温度変化を受けると、温度変化に依存した熱過度応答という電荷が発生するためである。現在はこの現象と感度の有利性から、次のせん断型が普及している。

せん断効果を利用する方式はせん断型 (shear type) と呼ばれる。圧電素子にずれを起させる方式である。せん断型加速度ピックアップは、圧縮型に比べ熱過度応答が小さい構造になっているため、低振動数の低レベルの振動測定に有利である。せん断型加速度ピックアップの例を図 3.2 に示す。同図の加速度ピックアップは、プレートせん断型という構造で、板状圧電素子に質量がねじによって固定され、円筒状圧電素子を用いるよりも強度が補強されている。

横効果を利用する方式は曲げ形 (bender type) と呼ばれる。圧電素子に曲げを与える方式で、共振振動数の低い、高感度のものができるが、機械的な強度の点から機械振動の測定にはほとんど利用されない。

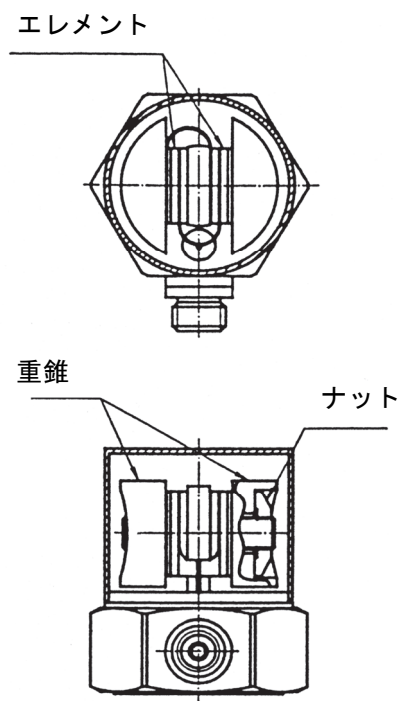


図 3.2 せん断型加速度ピックアップの例

3.3 加速度ピックアップの感度表示

加速度ピックアップの感度は、電荷増幅器の普及により、電荷感度によって表示される。電荷感度は、加速度 1 m/s^2 当りの電荷 C (クーロン、実用単位 pC : $1 \text{ ピコクーロン} = 10^{-12} \text{ C}$) すなわち $[\text{pC}/(\text{m/s}^2)]$ の単位で表示される。

電圧感度は、加速度ピックアップを電圧増幅器に接続する場合、たとえば騒音計のマイクロホンの代わりに加速度ピックアップを接続する場合などに用いる。

共振振動数よりも十分低い振動数において、振動加速度に比例した電荷を発生する加速度ピックアップの電圧出力は次式のような関係がある。

$$e = \frac{q}{C_E} \quad [\text{V}] \quad (3.1)$$

ここに、 e は開放出力電圧 (V)、 q は電荷 (C)、 C_E はピックアップの静電容量 (F) である。電圧感度は $[\text{mV}/(\text{m/s}^2)]$ の単位で表される。以前の加速度ピックアップの電圧感度 S_e は $[\text{mV}/\text{G}]$ の単位で表示されたが、 $[\text{mV}/(\text{m/s}^2)]$ への換算は次式による。

$$S_e = \frac{S_e(\text{mV}/\text{G})}{9.81(\text{m/s}^2)} \quad [\text{mV}/(\text{m/s}^2)] \quad (3.2)$$

電圧感度は、ピックアップケーブルの静電容量によって変化するので、以前は圧電素子の静電容量と付属のケーブルの静電容量を含めて表示されていた。

電荷感度 S_q と電圧感度 S_e の関係は次式で表すことができる。

$$S_e = \frac{S_q}{C_E + C_C} \times 10^3 \quad [\text{mV}/(\text{m/s}^2)] \quad (3.3)$$

$$S_q = eC_E \times 10^{-3} \quad [\text{pC}/(\text{m/s}^2)] \quad (3.4)$$

ここに、

S_e : 特定のケーブルを接続したときの電圧感度 $[\text{mV}/(\text{m/s}^2)]$

S_q : 電荷感度 $[\text{pC}/(\text{m/s}^2)]$

C_E : 圧電素子の静電容量 $[\text{pF}$ 、 $1 \text{ ピコファラッド} = 10^{-12} \text{ F}$]

C_C : ケーブルの静電容量 $[\text{pF}]$

e : 圧電素子の開放出力電圧 (ケーブルなしの電圧感度) $[\text{mV}/(\text{m/s}^2)]$

$$e = \frac{S_e C_D}{C_E} \quad [\text{mV}/(\text{m/s}^2)] \quad (3.5)$$

C_D : ケーブル付の静電容量 (圧電素子とケーブルの静電容量を含む) $[\text{pF}]$

$$C_D = C_E + C_C \quad (3.6)$$

ケーブルの静電容量の例を表 3.1 に示す。

表 3.1 ピックアップケーブルの静電容量

	型 式	径/長さ	静電容量
標準ケーブル	VP-51A	φ 2.1 mm/2 m	180 pF
標準(耐熱)ケーブル	VP-51B	φ 2.1 mm/2 m	220 pF
小型用ケーブル	VP-51L	φ 1.2 mm/2 m	260 pF
小型用(耐熱)ケーブル	VP-51LB	φ 1.35 mm/2 m	220 pF

3.4 アンプ内蔵ピックアップ







圧電式ピックアップは、出力インピーダンスが非常に高いため外来ノイズの影響を受けやすい。そのためローノイズケーブルが使用されるが、ケーブルが長くなるとノイズ発生は避けられない。これを避けるために、アンプ内蔵型ピックアップがある。感度は[mV/(m/s²)]で表示される。インピーダンス変換回路を内蔵して出力インピーダンスを下げているため、ローノイズケーブルを使用しなくてもケーブルを延長することが可能である。ピックアップに対して CCLD (Constant Current Line Drive) 回路から 2 mA~4 mA の定電流を供給する必要があるため、この CCLD 回路を内蔵している振動計や周波数分析器もある。電荷増幅器を使用する必要がなく、またピックアップケーブルの静電容量の影響が非常に小さいので便利である。

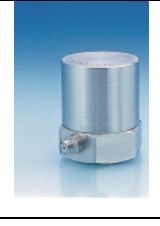





3.5 TEDS ピックアップ

振動計にピックアップを接続して使用する場合、必ず感度設定を行う必要がある。この感度を手動で入力する必要がなく、接続するだけで測定可能となる TEDS : Transducer Electronic Data Sheet (トランスデューサ電子データシート) 対応と呼ばれるピックアップがある。

TEDS は IEEE 1451.4 による規格で、ピックアップに製造者、型式、感度、質量などセンサ固有の情報を記録しておき、必要に応じて読み出す機能である。一部の振動計や周波数分析器にはセンサ固有情報を読み出すための回路やソフトウェアが内蔵されており、これらの測定器に接続するとセンサ感度は自動設定される。特に多点同時測定を行う場合は非常に便利である。多数のピックアップの感度入力作業が省略でき、また、接続を変更した場合でも感度設定を変更する必要がないため、測定ミスを減少させることができる。圧電式加速度ピックアップの例を表 3.2 に示す。汎用ピックアップ以外にも、3 方向ピックアップや、特別な用途として高温用 (260°C) ピックアップ、設備診断用ピックアップなどがある。

表 3.2 加速度ピックアップの製品例

外観						
型式	PV-03	PV-85	PV-91C	PV-91CH	PV-90T	PV-90B
特徴	標準ピックアップ	汎用	小型軽量 高温度用	小型・高感度 高温度用	TEDS アンプ内蔵	小型・軽量
質量 g	38	23	1.8	3	2	1.2
電荷感度 pC/(m/s ²)	0.47	6.42	---	---	---	0.18
電圧感度 mV/(m/s ²)	---	---	1	11	0.5	---
測定周波数範囲 Hz	20~1000 (±1%)	1~7000	1~20000 (±10%)	1~15000 (±10%)	1~12000 (±10%)	1~25000
使用温度範囲 °C	-50~200	-50~160	-50~170	-50~170	-20~100	-50~160
外形寸法 mm 高さ mm	φ 15.8 29	φ 17 18.5	7(八角) 12.5	8(八角) 13.3	φ 7 11.4	φ 6 10

外観						
型式	PV-87	PV-90H	PV-65	PV-10B	PV-97C	PV-97I
特長	大出力	小型 高温度用	高温度用	設備診断用 アンプ内蔵	3方向	小型3方向 アンプ内蔵
質量 g	115	2	26	120	4.7	8
電荷感度 pC/(m/s ²)	40	0.29	7.14	---	0.12	---
電圧感度 mV/(m/s ²)	---	---	---	5.1	---	1.1
測定周波数範囲 Hz	1~3000	1~20000 (±10%)	1~9000	3~8000	1~15000(Z) 1~10000(X・Y)	1~7000(Z) 1~5000(X・Y) (±10%)
使用温度範囲 °C	-50~160	-50~250	-50~260	-20~100	-50~160	-20~125
外形寸法 mm 高さ mm	φ 24 30.5	φ 7 11	φ 15.9 22.5	φ 23 40	14×14 角 6	12×12 角 12

3.6 加速度ピックアップの選択

加速度ピックアップの選択は、主に感度と測定振動数範囲で決まるが、両者は相反する関係である。振動数範囲を広く要求すれば感度は低くなり、同じく小型・軽量を要求すれば感度は低くなる。高感度を要求すれば測定振動数範囲は狭くなる。加速度ピックアップの感度と測定振動数範囲の関係の例を図 3.3 に示す。

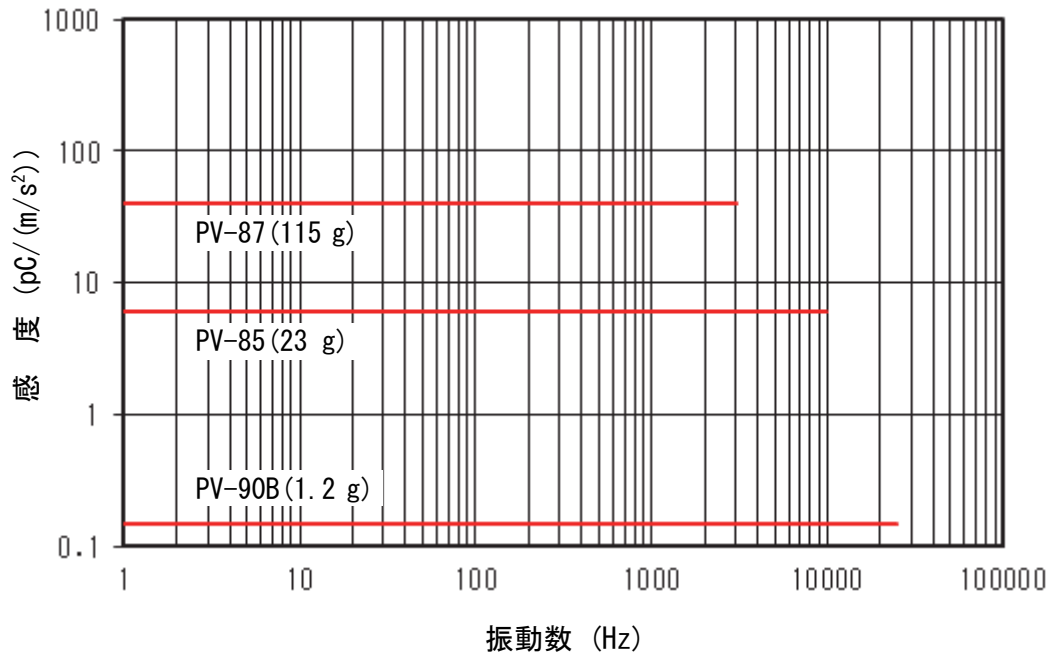


図 3.3 加速度ピックアップの感度と測定振動数範囲の関係

3.7 加速度ピックアップの質量

振動ピックアップ(以下、ピックアップ)を取り付ける際、振動している部分の振動状態を変化させないようにするため、ピックアップの質量、測定対象物の質量と振動測定点の材質、厚みなどに注意する。ピックアップの質量が振動体に及ぼす影響について経験的に決められた例を次に示す。

ISO 2373⁴⁾(振動シビアリティ測定器)では、ピックアップ部分の全結合質量は機械の質量の 1/50 より小さくしなければならないとしている。また ISO 2372⁵⁾(回転機械の振動評価基準)および JIS B 0907⁶⁾(回転機械及び往復動機械の振動—振動シビアリティ測定器に関する要求事項)では、ピックアップの質量は可能な限り小さくしなければならないとしている。

ピックアップの質量が大きすぎるかどうかは、次の方法で調べることができる。余分な質量を付加してピックアップと共に振動する質量を 2 倍にする。そのときの指示値が前の指示値と比較して 12 % (= 1 dB) 以上の差があれば、ピックアップの質量は被測定物に対して過大であり、この測定結果は用いてはならない。

備考

4) ISO 2373 Mechanical vibration of certain rotating electrical machinery with shaft heights between 80 and 400 mm - Measurement and evaluation of the vibration severity

5) ISO 2372 Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards

6) JIS B 0907(回転機械及び往復動機械の振動：振動シビアリティ測定器に関する要求事項)

ピックアップの質量の影響について、測定部位の材質ごとに、測定上限振動数(振動量が 3 dB 低下してしまう周波数)を図 3.4 に示す⁷⁾。

例として、1.6 mm の鉄の板に質量 35 g の加速度ピックアップを取り付けた場合、レスポンスが 3 dB 低下する振動数は約 1000 Hz となる。この振動数 f_{3dB} は次式から求められる。

鉄の場合

$$f_{3dB} = 14.5 \times 10^9 \frac{t^2}{m} \text{ [Hz]} \quad (3.7)$$

アルミニウムの場合

$$f_{3dB} = 5.1 \times 10^9 \frac{t^2}{m} \text{ [Hz]} \quad (3.8)$$

ここに、 t は板の厚さ (m)、 m は加速度ピックアップの質量 (g) である。

備考

7) Beranek, L. L.: Noise and vibration control (McGraw-Hill, New York, 1971) pp.62-65

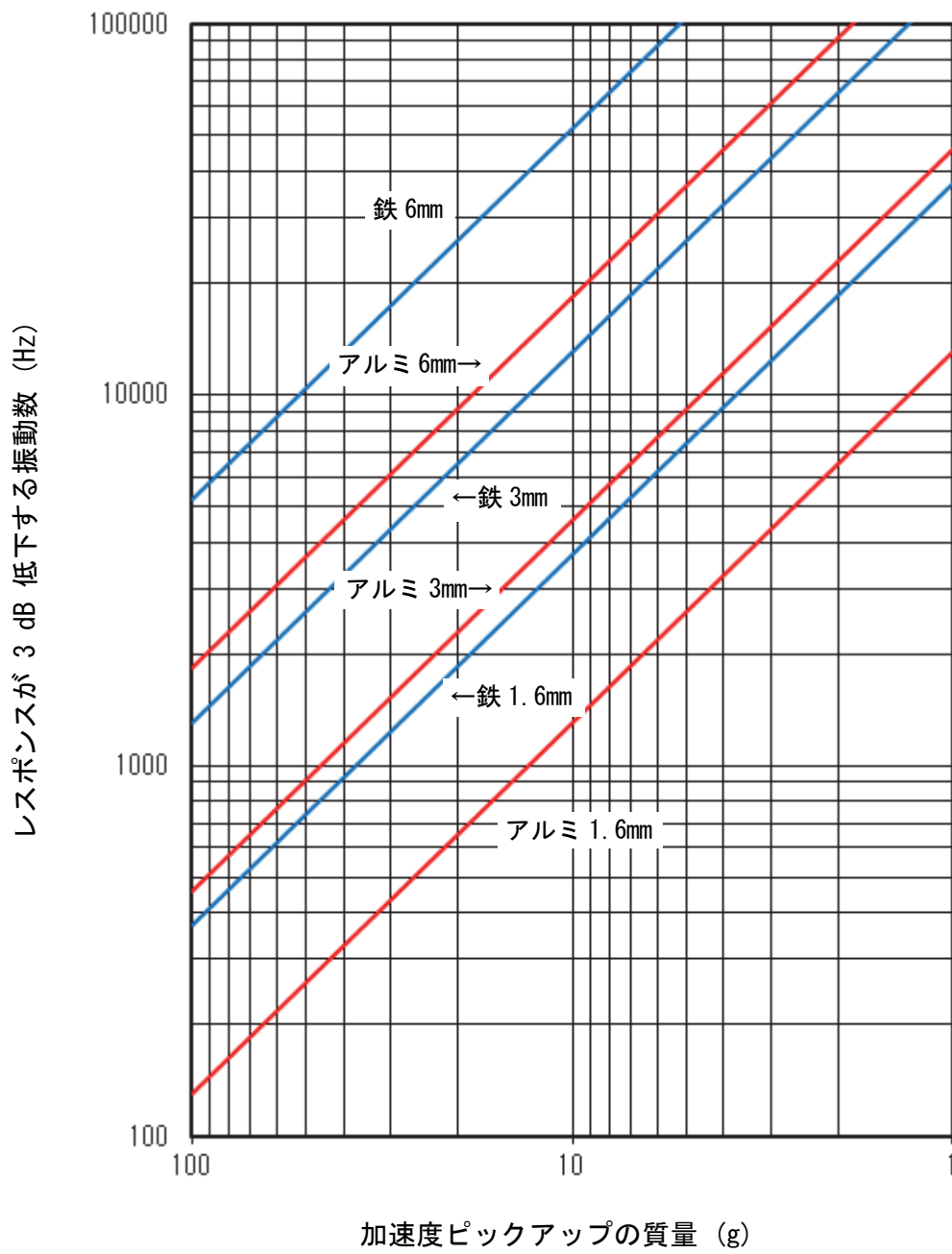


図 3.4 測定部位の材質と加速度ピックアップの質量の関係

3.8 加速度ピックアップの取り付け方法

3.8.1 取り付け方法と接触共振

実際に振動を測定する場合には、加速度ピックアップをねじで止める、手で押さえるなどにより、加速度ピックアップの運動が振動体の運動と一致していることが求められる。しかしその取り付け方法、あるいは接触方法によっては平坦な特性範囲が狭くなることがあり、完全な取り付けで行われる校正によって得られた特性を常に維持することは難しい。このため取り付け時には、必要な振動数範囲内に共振が生じないように注意する。

一般に使用されている加速度ピックアップ自体の固有振動数は 50 kHz 以上になっているが、振動体に取り付けると、加速度ピックアップの質量および接触部分のこわさ(ばね定数)によって一つの振動系が形成される。この系の固有振動数を接触共振周波数という。この接触共振周波数が測定振動数範囲内に入ると、振動体よりも加速度ピックアップの方が大きく振動することになり、正しい測定値は得られない。一般的に接触共振周波数の約 1/3 以下の範囲ならば平坦な特性が得られる。質量 23 g の加速度ピックアップ(PV-85)をいろいろな方法で取り付けたときの接触共振の変化を図 3.5 に示す。この加速度ピックアップの場合には、①ねじで固定あるいは②接着剤、③両面接着テープなどを使用し、さらに高域遮断フィルタを併用すれば約 10 kHz までの測定が可能である(ただし、ねじのゆるみ、テープの剥離には常に注意する)。ねじ、接着テープなどが使用できない場合には、⑤マグネット、⑥棒状アタッチメントなどを使用するが接触共振振動数の低下に注意する。一般には、機械振動の振動速度測定では、上限振動数が数百 Hz までの場合も多いので、マグネットあるいは棒状アタッチメントによる簡便な方法も有用である。実際の機械振動測定で現われる加速度ピックアップの接触共振の例を図 3.6 に示す。対象機械は、振動実験用モデルであり、回転数 1000 rpm である。図 3.6(1)はねじ止めで 10 kHz 以内に接触共振はみられない。(2)はマグネットアタッチメントを用いた場合で、約 9 kHz に接触共振が現われている。(3)は棒状アタッチメントを用いて手で接触させた場合で、約 3 kHz に接触共振が現われている。このように接触共振によって測定振動数範囲が狭くなるが、振動速度の測定であれば、マグネットを用いても問題なく測定できる。振動変位を測定する場合には通常、棒状アタッチメントの使用が可能である。

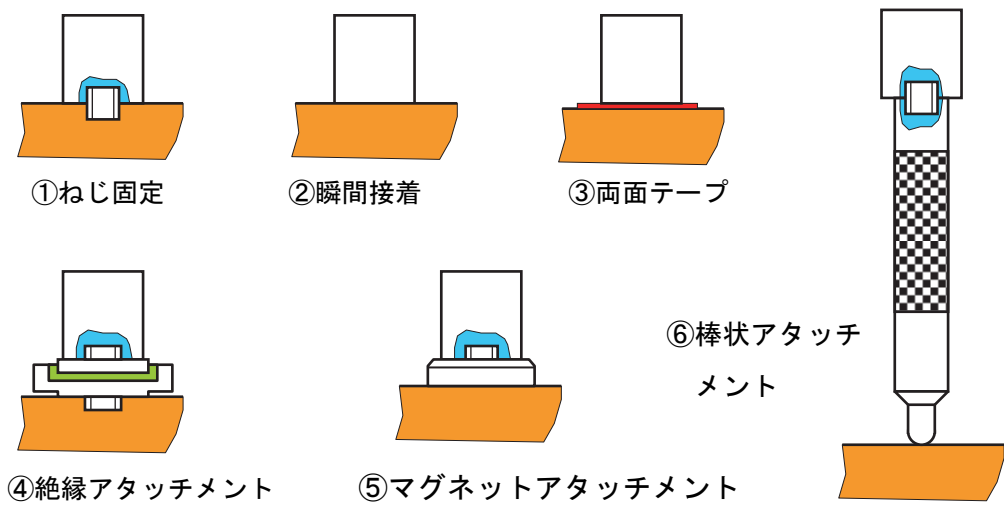
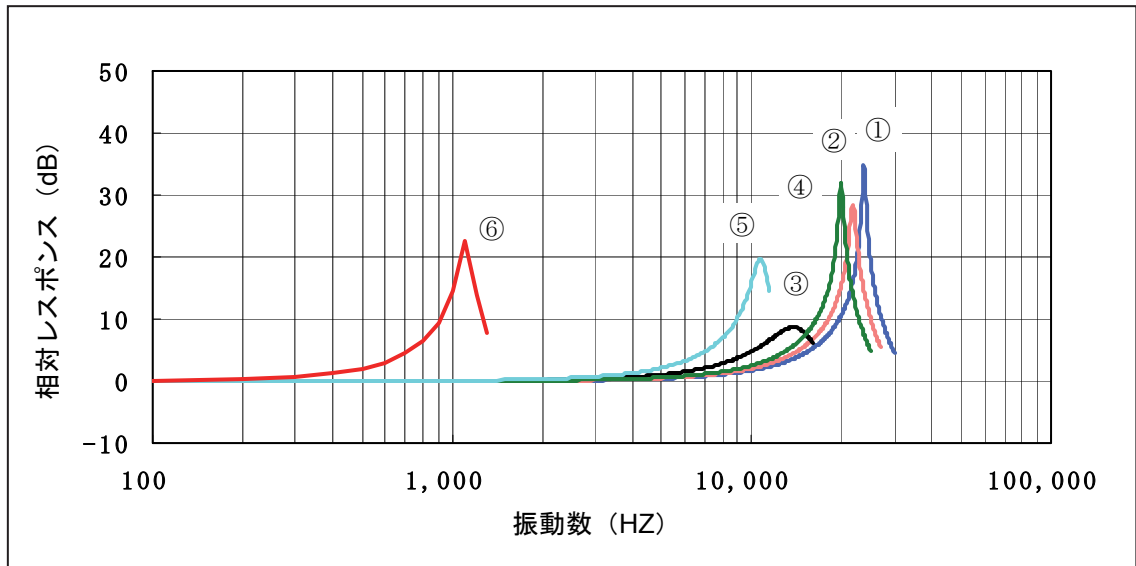
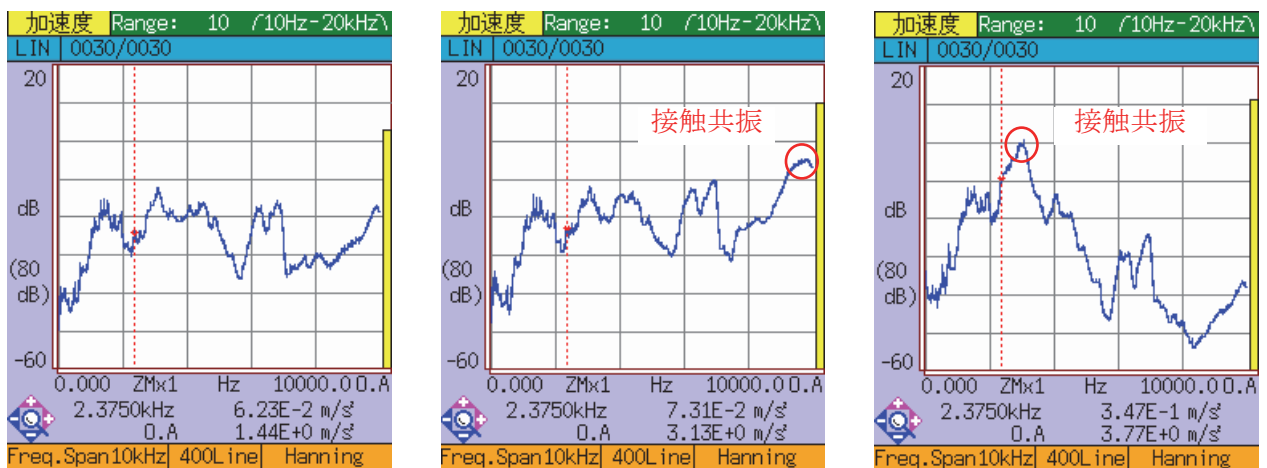


図 3.5 圧電式加速度センサの取り付け方法と接触共振の一例



- (1) ねじ止め (10 kHz まで測定可能)
- (2) マグネットアタッチメント (3 kHz 程度まで測定可能)
- (3) 棒状アタッチメント (1 kHz 程度まで測定可能)

図 3.6 機械振動測定で現れる加速度ピックアップの接触共振

3.8.2 アース電位の影響

図 3.5④の絶縁アタッチメントは、振動体と振動測定器の間でアース電位の差が問題になるとき、すなわち振動がないのに指示値が出るときに、加速度ピックアップと振動体を絶縁するためのアタッチメントである。それでもアース電位の影響が改善されないときは、二重シールド線を使用する方法もある。

3.8.3 振動方向

振動測定は、測定したい振動方向に加速度ピックアップの受感軸(最大感度を有する軸、通常は取り付け方向の軸)を合わせなければならない。取り付け位置によっては横向きに取り付けたり、狭い場所に取り付けたりするので、コネクタ(出力端子)が受感軸方向に位置するものもある。受感軸を合わせるために図 3.7 のようなブロックを用いることもできる。この場合もブロックの材質により接触共振が問題になるので図 3.8 などを参考にして注意する。薄い金属板のL金具の使用は避ける。これらの煩わしさを避けるためには、図 3.9 のような3方向同時に測定可能な3軸ピックアップを使用すると便利である。

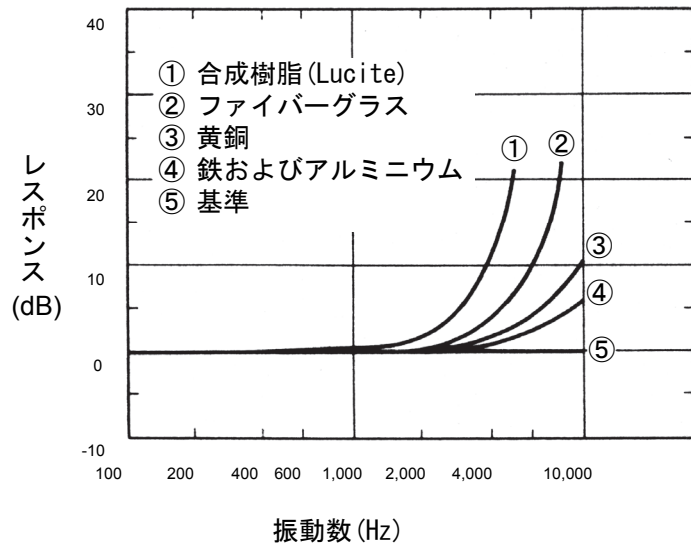
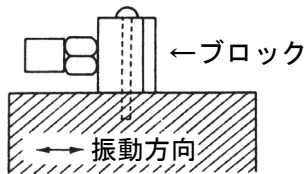


図 3.7 ブロック型アタッチメント

図 3.8 各種ブロック (1.9 cm 立方体) による接触共振



図 3.9 3軸ピックアップ

3.8.4 加速度ピックアップの横感度

同じ振動加速度振幅の振動を加速度ピックアップの垂直および水平方向に与えたときの周波数特性を図 3.10 に示す。軸感度(図中①のレスポンス)と横感度(図中②のレスポンス)の比を横感度比という。レスポンス -20 dBが横感度比 0.1 にあたる。この比は 0.05 以下程度で製造されているが、実用的には 0.1 以下であれば十分と考えられる。

加速度ピックアップに与えられる振動の方向による感度の変化を指向性といい、受感軸から角度 θ° の方向に振動加速度を与えたときの感度低下量 L (dB)は、次式によって求められる。

$$L = 20 \log_{10} \cos \theta \text{ [dB]} \quad (3.9)$$

加速度ピックアップの指向性を図 3.11 に示す。受感軸の方向近くでは、軸が若干ずれても感度にあまり変化はない。この指向性は 90° 方向のレスポンスと 0° 方向のレスポンスの比が横感度比になる。したがって、理想的には横感度比は無限小になるのであるが、実際の加速度ピックアップでは幾何学的な中心に若干ずれがあり、特に 90° の位置が指定されていない限り、図 3.10 程度の横感度比となる。

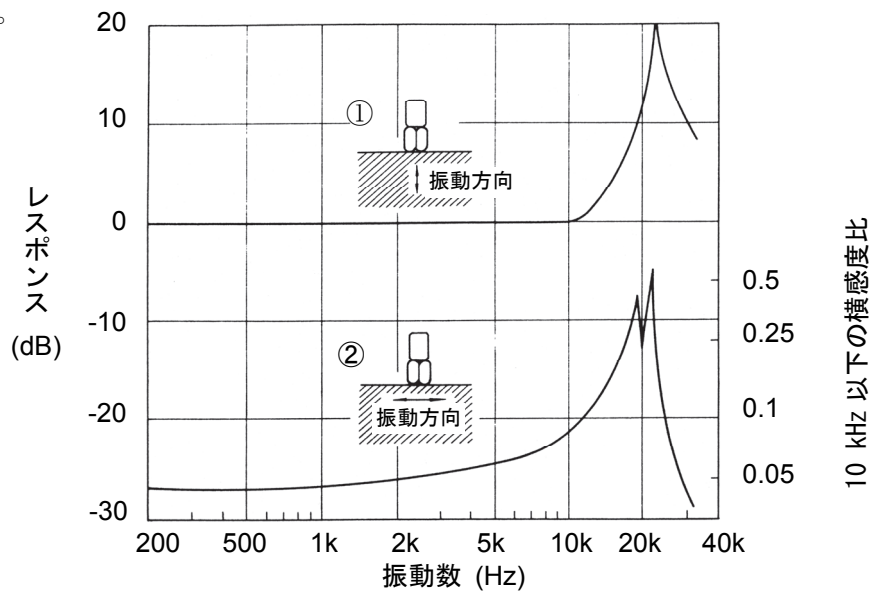


図 3.10 加速度ピックアップの横感度の例

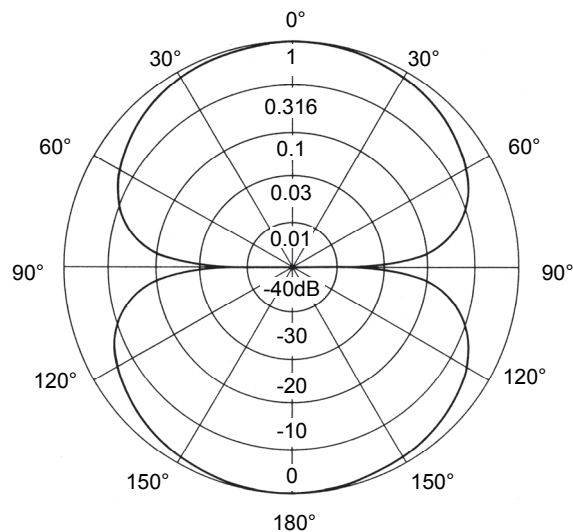


図 3.11 加速度ピックアップの指向特性

3.8.5 加速度ピックアップの使用温度特性

加速度ピックアップの使用温度特性の例を図 3.12 に示す。

この加速度ピックアップの電荷感度の場合、周囲温度 -20°C ~ 150°C 程度まで温度の影響を受けないといえる。

高温用加速度ピックアップの使用温度特性の例を図 3.13 に示す。この高温用加速度ピックアップの場合、周囲温度 -50°C ~ 250°C 程度の範囲で使用できる。

なお、高温用加速度ピックアップのケーブルは、同じく高温用耐熱ケーブル(たとえば、 260°C 用、 300°C 用など)を使用する。

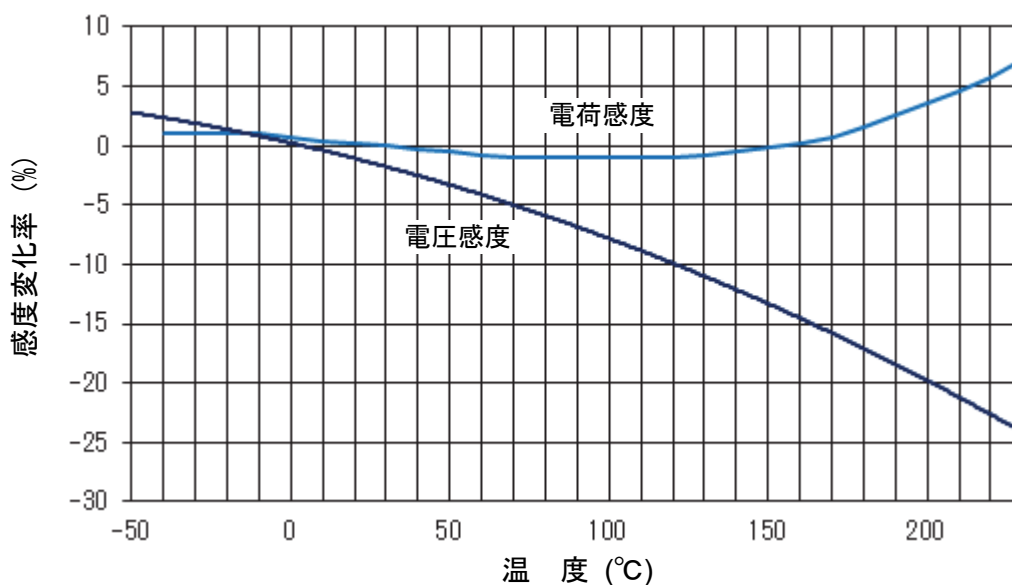


図 3.12 加速度ピックアップの温度特性の例

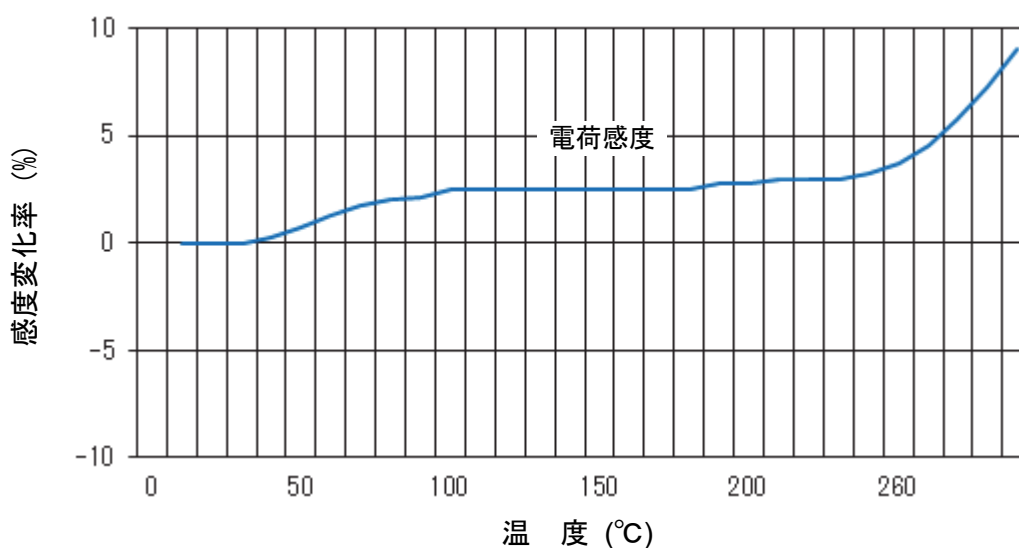


図 3.13 高温用加速度ピックアップの温度特性の例

3.8.6 ピックアップケーブル

ケーブルが動揺すると雑音を発生することがある。これはケーブルが動揺する、あるいは衝撃を受けることでケーブルの導線と誘電体が分離して一種のコンデンサが形成され、摩擦によって誘起される電荷が蓄えられるためである。専用のケーブルは、この雑音を防止するための対策が施されているが、使用に際しては、例えば図 3.14⁸⁾のようにケーブルが揺れない工夫をする。

備考

8) ISO 5348 Mechanical vibration and shock – Mechanical mounting of accelerometers

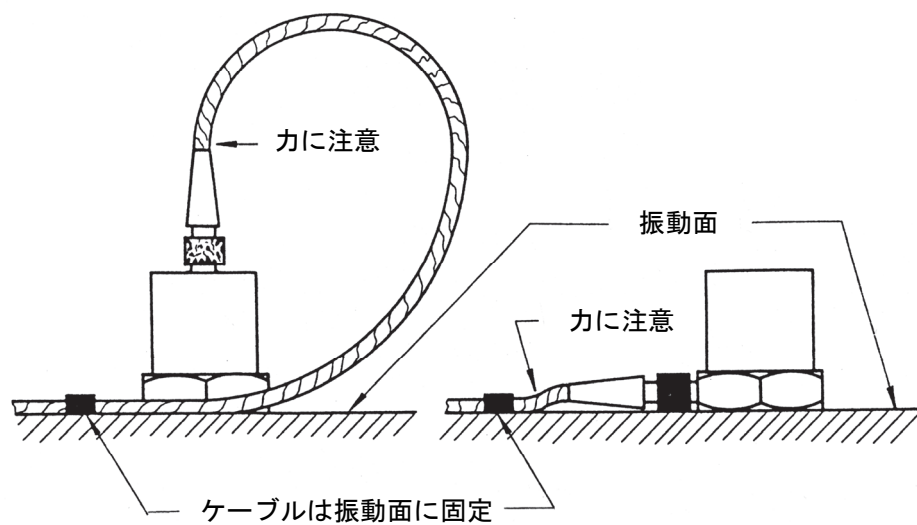


図 3.14 ピックアップケーブルの揺れ防止

4. 振動測定器

4.1 振動計

機械振動測定用の振動計には、ペンシル型から実験室用まで多くの種類がある。圧電式加速度ピックアップを使用する一般的な機械振動測定用の振動計の基本構成を図 4.1 に示す。

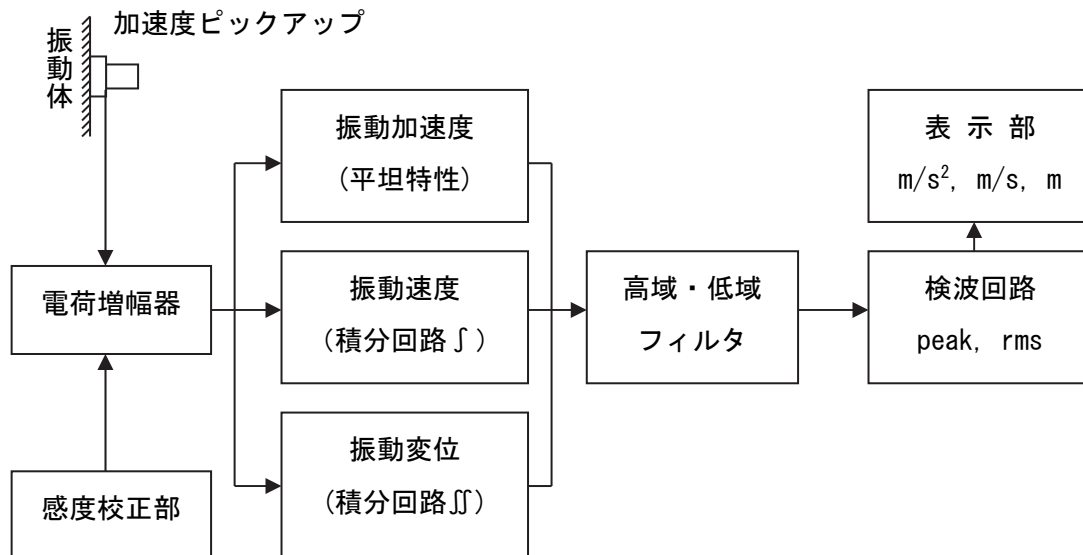


図 4.1 振動計の基本構成

4.1.1 加速度ピックアップ

加速度ピックアップについては「3. 圧電式加速度ピックアップ」を参照されたい。特に注意すべき事項は、①せん断型か圧縮型かの確認、②測定周波数範囲、③感度、④温度範囲、⑤質量、⑥形状、⑦ケーブルの長さ、⑧附属のアタッチメントの種類、⑨特別にアタッチメントを製作する必要の有無などである。

4.1.2 電荷増幅器

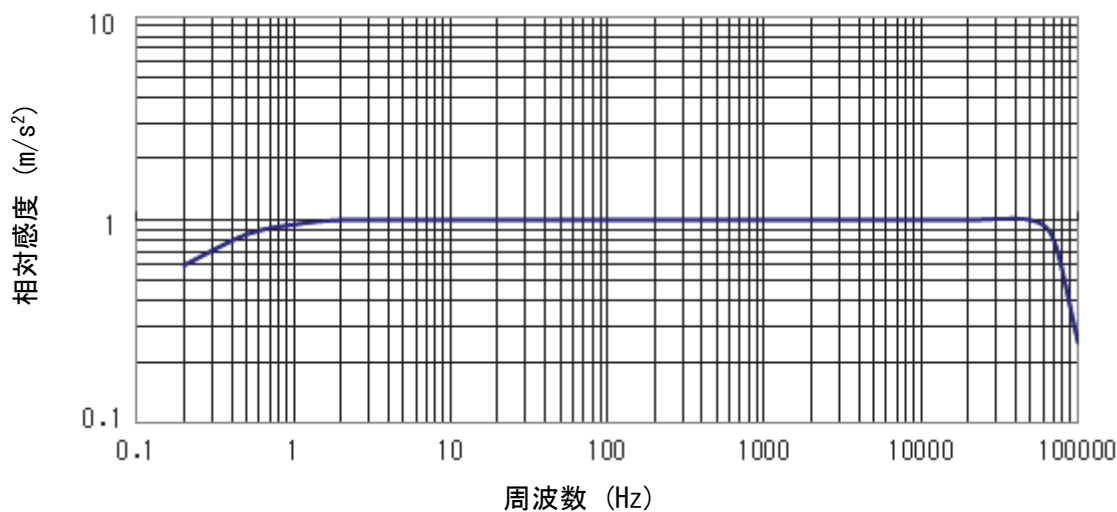
圧電式加速度ピックアップの電荷を入力信号とする電荷増幅器の特長は、ピックアップケーブルの長さの影響を受けないことである。多くの振動計は電荷増幅器を用いている。

4.1.3 積分回路

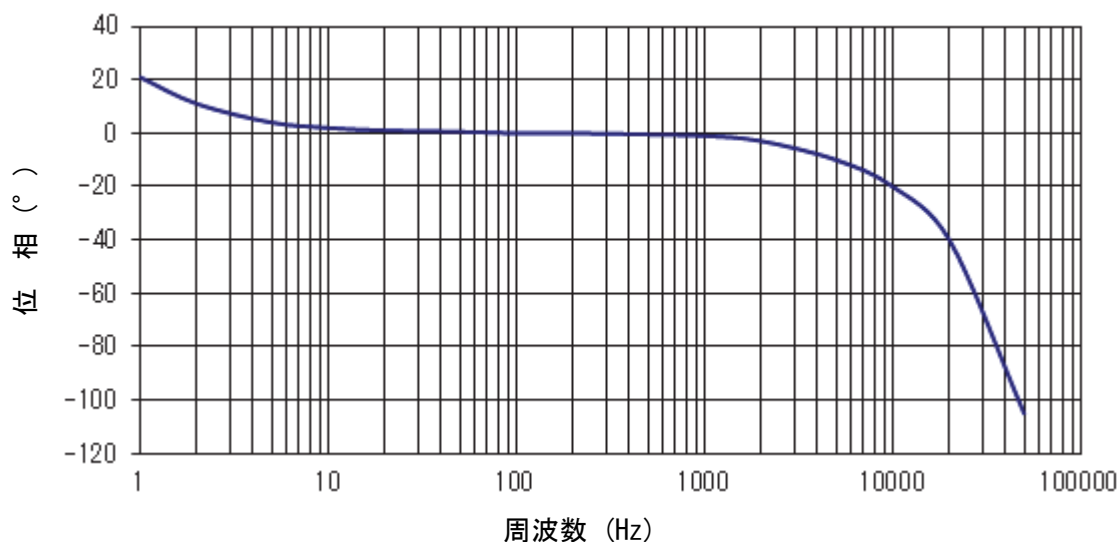
加速度ピックアップの出力は振動加速度に比例する。このため平坦特性の回路の出力は振動加速度信号である。加速度ピックアップの出力を積分回路で積分すると振動速度信号となり、同様に2回積分をすると振動変位信号になる。

振動加速度の測定周波数範囲は、一般に非常に広くとってあるが、振動速度や振動変位の測定周波数範囲の上限が制限されて狭くなる。また、2回積分をする振動変位の測定では、衝撃的な振動が入力されると積分回路の過渡現象により出力信号に動揺が現われることがあるので注意する。

加速度ピックアップを用いる振動計の周波数特性の例を図4.2に、積分回路の特性を図4.3に示す。



(1) 振動数特性



(2) 位相特性

図4.2 振動計の周波数特性の例

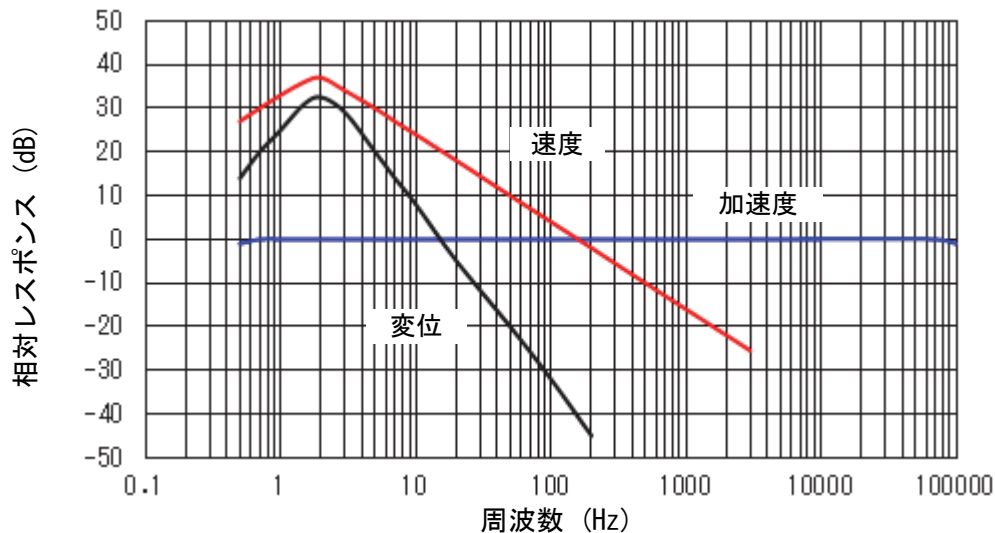


図 4.3 積分回路の特性

4.1.4 ハイパスフィルタ・ローパスフィルタ

ハイパスフィルタとローパスフィルタは、測定振動数範囲を任意に制限するためのフィルタである。

ハイパスフィルタは、低い周波数成分を遮断し、高い周波数成分を取り出すもので①加速度ピックアップの熱過度応答の影響を低減、②ピックアップケーブルの揺れによる雑音の低減、③積分回路の過渡現象の低減、④対象機械振動の低域振動数の不要な成分をカットするなどの目的に使用する。

ローパスフィルタは、高い周波数成分を遮断し、低い周波数成分を取り出すもので、①加速度ピックアップの接触共振の影響を低減、②対象機械振動の高域振動数の不要な成分をカットするなどの目的に使用する。

これらのフィルタの性能は遮断周波数と遮断特性によって規定される。遮断周波数は、振動成分が 10% 減衰する周波数が仕様書に記載されていることが多い。遮断特性は、1 オクターブ（周波数が 2 倍）当りの減衰量が記載される。減衰する数値が大きいほど遮断性能が良い。

振動計のフィルタの減衰量は -18 dB/oct. であることが多い。図 4.4 にローパスフィルタの特性例を示す。異なった振動計の測定結果を比較する場合は、測定される周波数範囲によって値が異なるため、ハイパスフィルタやローパスフィルタの形状、および設定条件が同一であるかどうかを確認する必要がある。

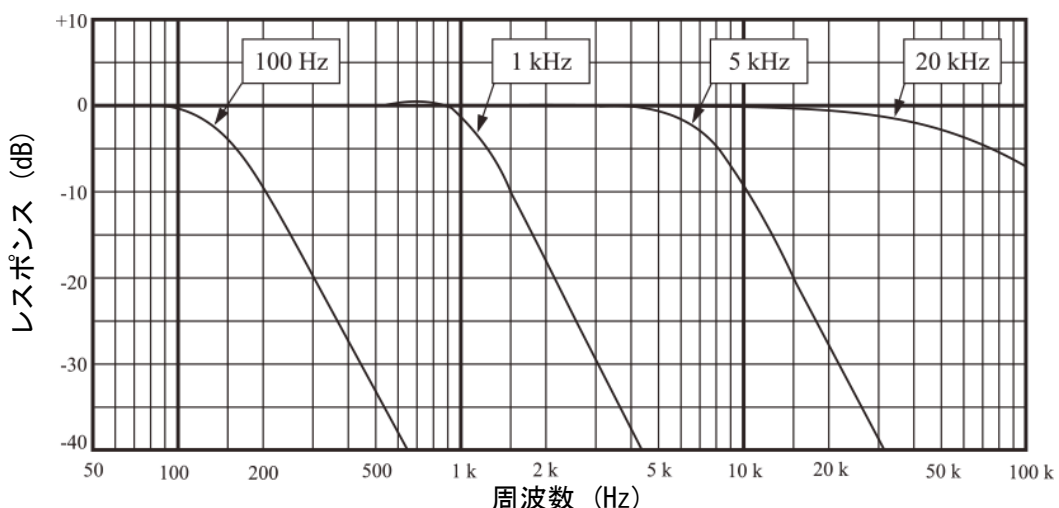


図 4.4 ローパスフィルタの特性例

4.1.5 振動量指示部

振動量指示部は、振動加速度、振動速度、振動変位のピーク値あるいは実効値を指示(表示)するものである。指示部の動特性または時定数は1秒であることが多いが、機種などによって異なる場合があるので仕様書などで確認する。

4.1.6 オーバーロード

振動が入力レンジの上限値を超えるとオーバーロードが発生する。この場合、測定対象とする振動波形が飽和してしまうため、実際よりも小さな値として計測される。また周波数分析を行うと実在しない周波数成分が現れる。振動計にはオーバーロードインジケータが付いており、オーバーロードの発生を確認することができる。オーバーロードが発生した場合は入力レンジを上げて、大きなレンジに変更する必要がある。オーバーロードは振動波形の段階で発生するため、衝撃性が高い振動の場合は、測定結果として表示される実効値が入力レンジのフルスケールよりかなり小さい値であっても発生する。振動計によっては、入力レンジの上限値の上に過負荷領域と呼ばれる余裕範囲を広く持ったものがあり、オーバーロードが発生しにくい。

4.1.7 感度校正

使用する加速度ピックアップの感度に合わせて振動計の感度を設定する。校正の方法は取扱説明書に従う。通常は振動計の内部校正部による基準信号の指示値を指定の位置に合わせる、あるいは感度校正ダイヤルをピックアップの感度の数値にセットする。TEDSピックアップの場合は、感度が自動的に設定される。

基準の振動加速度を与える校正器を使用すると、加速度ピックアップを含めた測定系の校正ができる。一例として、振動数 159 Hz、振動加速度 10 m/s² (rms) を発生する感度校正器(図 4.5)がある。

加速度ピックアップの感度校正は製造業者に依頼すればよいが、加振装置を利用できる場合には、標準加速度ピックアップを用いて校正することができる。標準加速度ピックアップは感度が非常に安定している。試験対象のピックアップと加振テーブルの間に、この標準加速度ピックアップを取り付けて、その出力と比較校正をする。この方法を **back to back** 方式という。



図 4.5 校正用加振器

4.2 周波数分析器

一般に、機械振動は非常に複雑な振動波形になっている。これは多数の周波数成分が合成されたものである。この複雑な振動波形を周波数帯域ごとに分解することを周波数分析という。周波数分析を行うための分析器は、大きく分けて FFT(高速フーリエ変換)分析器と 1/N オクターブバンド分析器があり、分析の目的に応じて選択される。

FFT 分析器は、機械振動の低減対策において機械の動作と振動の関連を知る場合や、多数の振動部分から到達する振動のスペクトルから振動源を同定する場合に用いられることが多い。

1/N オクターブバンド分析器は、感覚量の評価を目的とした周波数分析や製品検査などに使用されることが多い。1/N オクターブバンドフィルタによって実現されるが、オクターブバンドや 1/3 オクターブバンド分析器が最も多く使用されている。特に狭帯域分析が必要な場合は 1/12 や 1/24 オクターブバンド分析器も使用される。フィルタは IEC や JIS により規格化されているため、データに互換性があり、測定者が異なっても比較が容易である。

1/N オクターブバンド分析器のフィルタは、その中心周波数が変わったとき、一定の比でフィルタの帯域幅が変わる定比帯域幅形である。一方 FFT 分析器のフィルタは、フィルタの中心周波数が変わってもその帯域幅が変化しない定帯域幅形である。FFT 分析器は任意の定帯域幅の分析を行うことができ、高い周波数になれば定比帯域幅に比べて周波数分解能が上がる。同振幅(振動加速度 1.4 m/s^2)である 125 Hz、200 Hz、250 Hz、270 Hz の正弦振動の合成振動について、三つの方式によって周波数分析を行った場合の結果を図 4.6 に示す。このようにオクターブバンド分析では周波数成分を明確に特定することができないので、機械振動では用いられることは少なく、1/3 オクターブバンド分析と FFT 分析が併用されるのが一般的である。

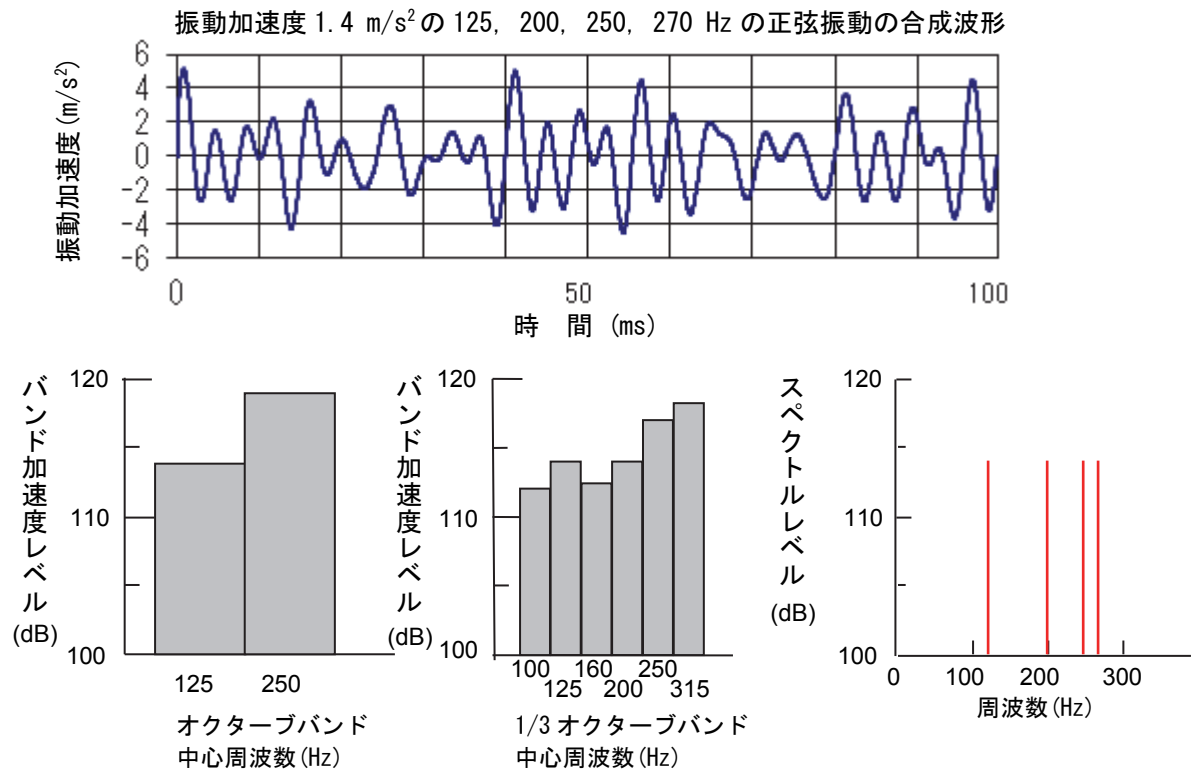


図 4.6 同じ複合振動を各種分析器で分析した例

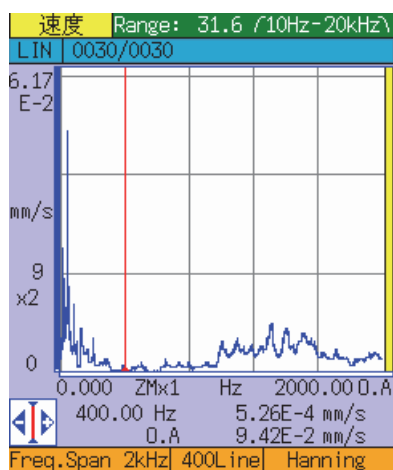
4.2.1 FFT 分析器

フーリエ変換は、いろいろな信号について波形分析を行う手法の一つであり、その演算を高速に行う FFT (Fast Fourier Transform) 方式の周波数分析器は、小型・軽量化が図られ、現場でも使用できる周波数分析器として実用化している。さらに FFT 分析機能を内蔵したハンディな振動計が開発されている。

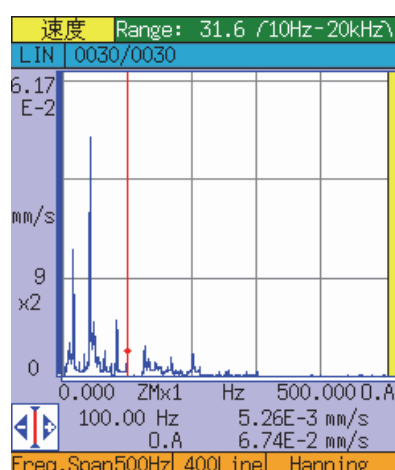
しかし、FFT 分析器は汎用の信号処理装置で、特に共通規格は定められていないので、製品によってそれぞれ特徴がある。振動の測定に際しては個々の取扱説明書に従って使用する。測定条件の設定に際して、少なくとも常に注意することが望ましい事項を示す。

(1) 分析周波数：

周波数スパンとも呼ばれる。分析する上限周波数であり、目的の範囲を含むように設定する。広くすると低い周波数成分が観測しにくい。狭くすると分析時間が長くなる。図 4.7 は分析周波数を変化させた例である。図 4.7(1) は 2 kHz、図 4.7(2) は 500 Hz である。分析周波数を下げると周波数分解能が上がるため、100 Hz 以下の周波数構造が詳細に分析されている。



(1) 上限周波数 2 kHz



(2) 上限周波数 500 Hz

図 4.7 分析周波数を変化させた例

(2) 分析点数：

FFT では、A/D 変換された時間波形からある長さの時間波形を切り出してフーリエ変換を行う。この場合に使用する時間波形のサンプル個数が分析点数である。

(3) 分析時間 T [s] :

$$T[s] = (1/f_s) \times \text{分析点数}$$

時間波形をサンプルするために必要な時間で、フレーム時間とも呼ばれる。ここで、 f_s はサンプリング周波数 (Hz) である。アナログ信号をデジタル変換する場合、原信号の情報を失わないためには、サンプリング周波数は分析周波数の2倍以上であることが必要である。その条件を満足しないと、エイリアシングと呼ばれる現象が発生し、分析周波数よりも高い周波成分が存在する場合に、分析結果の中に混じって現れる。実際の FFT 分析器では、エイリアシングを避けるため余裕をもって

$$f_s = \text{分析周波数} \times 2.56$$

としていることが多い。

分析結果は分析時間ごとに1つ得られるが、分析時間内に周波数成分の変動があっても、どの時刻に変動があったかは不明である。図 4.8 は衝撃的な信号を異なる分析時間で分析した例である。上図の分析時間は下図の2倍であり、2回の結果を算出する間に下図では4回の結果を算出する。下図では4回のように分析時間を短くすれば、時間精度よく衝撃波形を分析できる。しかし、時間分解能と周波数分解能は相反する関係があり、時間分解能を上げると周波数分解能が悪くなる。

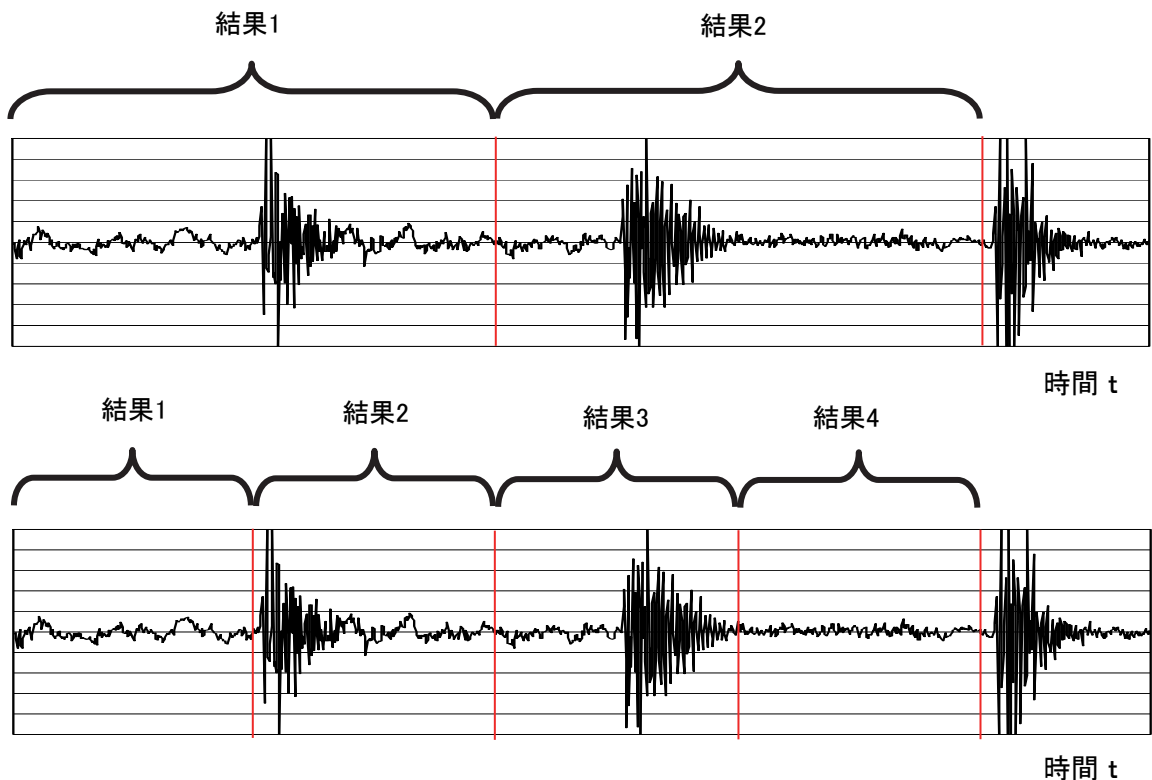


図 4.8 分析時間と時間分解能

(4) 分析ライン数：

分析結果を何本の線スペクトルで表示するのかを示す。一般的には

$$\text{分析ライン数} = \text{分析点数} / 2.56$$

である。

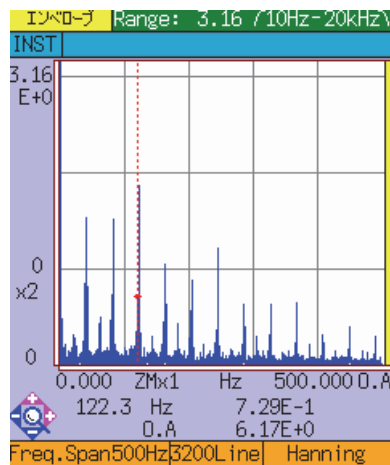
分析ライン数を増やすと周波数分解能は向上するが、時間分解能は悪くなる。

周波数分解能 Δf (Hz)は

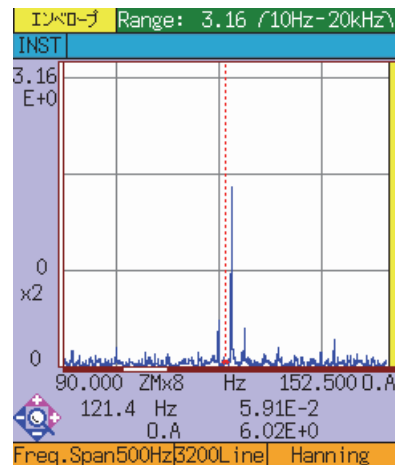
$$\Delta f = \text{分析周波数} / \text{分析ライン数}$$

となる。

最近ハンディタイプのFFT分析器でも3200ラインの分解能を持つものが製品化されており、現場においても詳細な分析が可能となった。図4.9は1200 rpmで回転しているベアリングの内輪傷を3200ラインで分析した例である。図4.9(1)は、分析周波数全体の範囲である0~500 Hzを、図4.9(2)は図4.9(1)の左から3番目のピーク付近を拡大表示したものある。内輪傷によって発生した周波数と回転数に相当する20 Hzのサイドバンドを確認することができる。



(1) 0~500 Hz の3200ライン表示



(2) 拡大表示

図4.9 3200ラインによる分析例

(5) 時間窓関数 :

FFT は時間波形を切り出して計算を行うが、その場合に切り出したデータの両端が連続していないと、実在しない周波数成分が分析結果に現れる「リーケージ」と呼ばれる現象が発生する。

図 4.10(1)が原波形、図 4.10(2)が切り出された波形とする。FFT では、図 4.10(3)のように図 4.10(2)の波形が連続して繰り返されると見なして計算する。この場合、接合部に波形の不連続が発生するためリーケージが生じる。

リーケージの影響を小さくするために、時間窓関数を使用される。ハニング、フラットトップなどがあり、測定対象によって適切な窓関数を使い分ける必要がある。窓関数を使用しない場合は、レクタンギュラ（矩形窓）と呼ばれる。

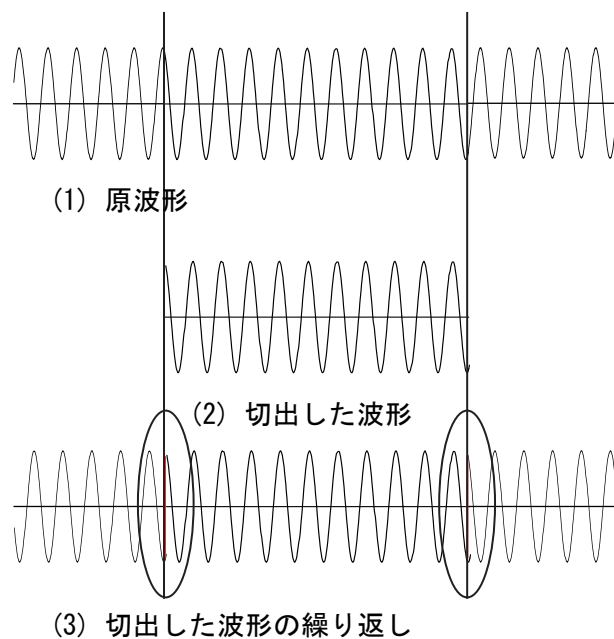
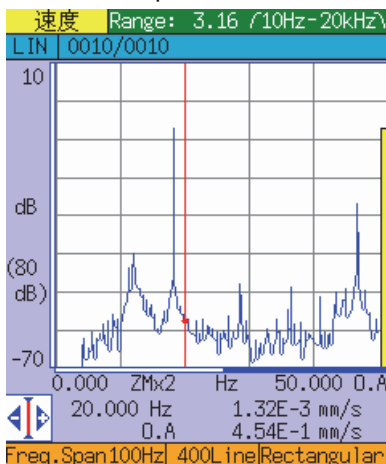


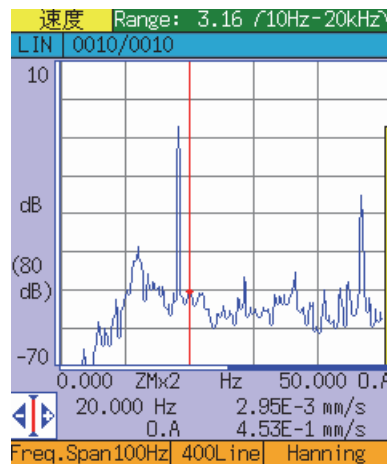
図 4.10 時間波形切り出しによる不連続

図 4.11 は、アンバランス状態で回転している円盤の軸受振動を FFT 分析した結果である。図 4.11(1)～図 4.11(3)は 1095 rpm、図 4.11(4)～図 4.11(6)は 1087.5 rpm で回転させた時の分析結果である。図 4.11(1)と図 4.11(4)はレクタンギュラ、図 4.11(2)と図 4.11(5)はハニング、図 4.11(3)と図 4.11(6)はフラットトップの時間窓関数を使用している。アンバランスによる振動であるので、波形は正弦波に近い。1095 rpm で回転している場合は、リーケージが発生しない。図 4.11(1)～図 4.11(3)のように、どの時間窓関数を使用しても、回転周波数が 1 本の線スペクトルになっており、ピークレベルの大きさも同じである。ただし、窓関数の違いによりスペクトルの太さが異なっている。レクタンギュラが最も細く、フラットトップが最も太い。これは、フラットトップは周波数分解能が最も悪いことを意味する。1087.5 rpm で回転している時はリーケージが発生する。レクタンギュラの場合、図 4.11(4)のように、ピークレベルが下がり、しかも裾が広がったスペクトルになっている。ハニングの場合は、図 4.11(5)のように裾は広がっていないが、少しピークレベルが下がっている。フラットトップでは、裾の広がりもなく、またピークレベルも下がっていない。しかし、小さな山谷が判別できない。時間窓関数の主な用途は次のようなものである。レクタンギュラは、一般的な連続信号の分析には不向きであるが、打撃加振によって発生する衝撃信号の分析などに用いられる。ハニングは、一般的な連続信号の分析に広く使用されるが、衝撃信号の分析には使用しない。フラットトップは正弦波の振幅を正確に読み取る場合に使用されるが、周波数分解能は悪い。

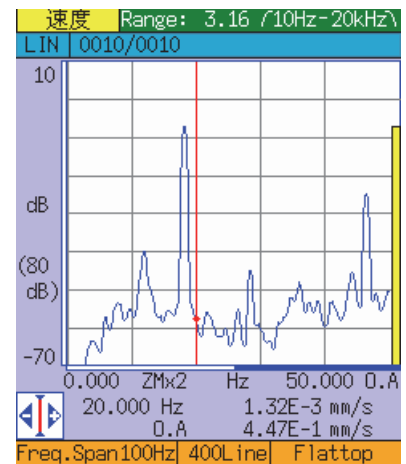
● 1095 rpm のスペクトル



(1) レクタンギュラ (矩形窓)

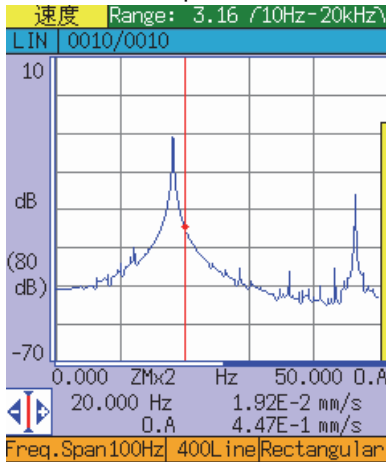


(2) ハニング窓

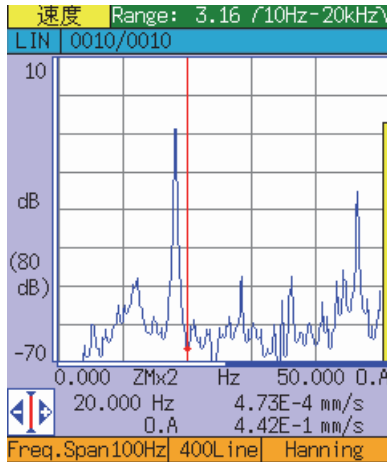


(3) フラットトップ窓

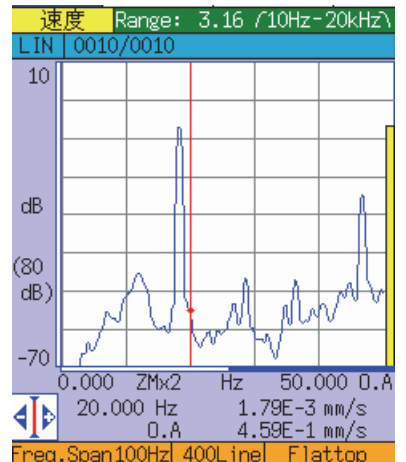
● 1087.5 rpm のスペクトル



(4) レクタンギュラ (矩形窓)



(5) ハニング窓



(6) フラットトップ窓

図 4.11 時間窓関数による分析結果の違い

(6) オーバーロード :

入力信号が入力レンジを超えるとオーバーロードが発生し、**図 4.12** のように波形が飽和してしまう。本来は**図 4.12(1)**のような波形であるが、入力レンジを超えた部分が頭打ちとなり**図 4.12(2)**のような波形となる。**図 4.12(3)**は本来の信号の周波数分析結果であるが、オーバーロードによって**図 4.12(4)**のように実在しない周波数成分が発生する。

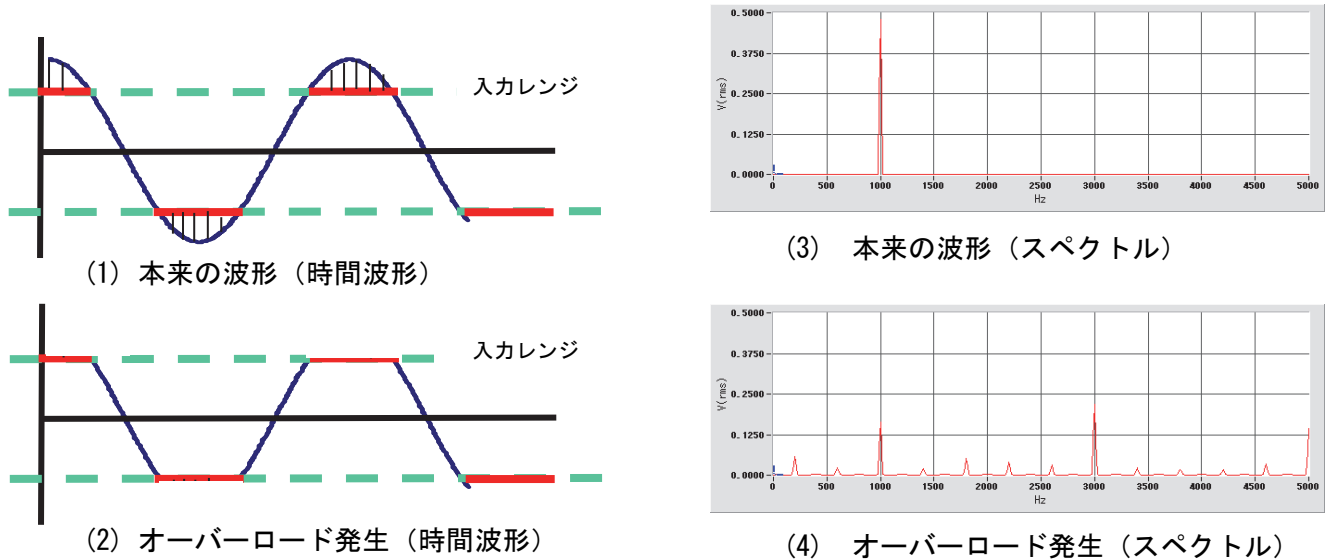


図 4.12 オーバーロードの影響

(7) Y 軸の表示範囲 :

特に小さな値を分析する場合、A/D 変換器のビット分解能や分析器から発生する雑音成分の影響が現れる。たとえば、時間波形の表示を行う場合に拡大倍率を上げていくと、表示されたデータが**図 4.13** のように階段状に見えることがある。これは Y 軸を拡大し過ぎたためである。A/D 変換器のビット分解能に相当する離散的な値が階段状の値として表示される。

スペクトルを dB 表示する場合に表示範囲を下側に拡大し過ぎると、データに無関係な測定器の自己雑音成分が表示される。最近の FFT 分析器では表示範囲を 100 dB 程度まで拡大すると現象が現れる。

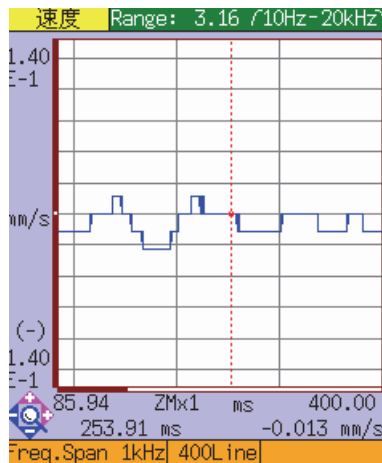


図 4.13 A/D 変換器のビット分解能

4.2.2 オクターブおよび1/3オクターブバンド分析器

オクターブバンド分析器は、少なくとも中心周波数 31.5 Hz～8 kHz の 9 個のフィルタを備え、それらの出力を同時に取り出す実時間分析方式のものと手動で出力を選択する方式がある。オクターブバンド分析器は機械振動の測定にはほとんど使用されないことを前述したが、以下では 1/3 オクターブバンド分析器との比較、およびバンドパスフィルタの理解のために示してある。

1/3 オクターブバンド分析器は、少なくとも中心周波数 20 Hz～20 kHz の 33 個のフィルタを備える。オクターブおよび 1/3 オクターブバンド分析器の性能は、JIS C 1513⁹⁾で規定されている。フィルタのみの性能については、IEC 61260¹⁰⁾ を基礎にした規格である JIS C 1514 で規定されている。

備考

9) JIS C 1513(音響・振動用オクターブ及び 1/3 オクターブバンド分析器)

10) IEC 61260: Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters

ここではフィルタ部について IEC 61260 を参考にして述べる。

オクターブ比は、2:1 の公称周波数（厳密な周波数を丸めた値）の比で、記号は G である。この比は、次のように表される。

10 のべきによる系 (base-ten system) では、

$$G_{10} = 10^{3/10}$$

2 のべきによる系 (base-two system) では、

$$G_2 = 2$$

とする。どちらも認められているが、10 のべきによる系が推奨されている。

フィルタの帯域幅の分数は、 $1/N$ で表す。基準周波数は 1000 Hz であり、 f_r で表す。厳密な中心周波数 f_m は次式による。

$$\text{帯域幅の分数の分母 } N \text{ が奇数の場合 } f_m = (G^{x/N})(f_r)$$

$$\text{帯域幅の分数の分母 } N \text{ が偶数の場合 } f_m = (G^{(2x+1)/(2N)})(f_r)$$

ここに、 x は正、負またはゼロの整数（1000 Hz を 0 にして、低い周波数のフィルタは 800 Hz: -1、630 Hz: -2...のように、また 1250 Hz: 1、1600 Hz: 2...のようになる。）

帯域端周波数の下限周波数 f_1 および上端周波数 f_2 は次式による。

$$f_1 = (G^{-1/(2N)})(f_m)$$

$$f_2 = (G^{+1/(2N)})(f_m)$$

これらの式によって求めた各フィルタの周波数帯域(下限周波数および上限周波数)および帯域幅を表 4.1 および表 4.2 に示す。

フィルタは、主にフィルタの減衰特性によって、クラス 0、1、2 に分類されるが、JIS C 1513 ではクラス 1 とクラス 2 が規定されている。クラス 1 およびクラス 2 のフィルタの減衰特性における許容範囲を図 4.14 に示す。クラスの主な違いは、許容偏差と特性のスカートにおけるシャープさである。

表 4.1 オクターブバンドフィルタの中心周波数と帯域幅

中心周波数 f_m (Hz)	周波数帯域 $f_1 \sim f_2$ (Hz)	帯域幅 $f_2 - f_1$ (Hz)
31.5	22.4 - 44.7	22.3
63	44.7 - 89.1	44.5
125	89.1 - 178	89
250	178 - 355	177
500	355 - 708	353
1000	708 - 1413	705
2000	1413 - 2818	1406
4000	2818 - 5623	2805
8000	5623 - 11220	55597

f_m : 公称中心周波数、 f_1 : 下端周波数、 f_2 : 上端周波数

(計算は base-ten system による)

表 4.2 1/3 オクターブバンドフィルタの中心周波数と帯域幅

中心周波数 f_m (Hz)	周波数帯域 $f_1 \sim f_2$ (Hz)	帯域幅 $f_2 - f_1$ (Hz)	中心周波数 f_m (Hz)	周波数帯域 $f_1 \sim f_2$ (Hz)	帯域幅 $f_2 - f_1$ (Hz)
20	17.8 - 22.4	4.6	800	708 - 891	183
25	22.4 - 28.2	5.8	1000	891 - 1122	231
31.5	28.2 - 35.5	7.3	1250	1122 - 1413	291
40	35.5 - 44.7	9.2	1600	1413 - 1778	366
50	44.7 - 56.2	11.6	2000	1778 - 2239	461
63	56.2 - 70.8	14.6	2500	2239 - 2818	580
80	70.8 - 89.1	18.3	3150	2818 - 3548	730
100	89.1 - 112	23.1	4000	3548 - 4467	919
125	112 - 141	29	5000	4467 - 5623	1157
160	141 - 178	37	6300	5623 - 7079	1456
200	178 - 224	46	8000	7079 - 8913	1833
250	224 - 282	58	10000	8913 - 11220	2308
315	282 - 355	73	12500	11220 - 14125	2905
400	355 - 447	92	16000	14125 - 17783	3657
500	447 - 562	116	20000	17783 - 22388	4605
630	562 - 708	146			

f_m : 公称中心周波数、 f_1 : 下端周波数、 f_2 : 上端周波数

(計算は base-ten system による)

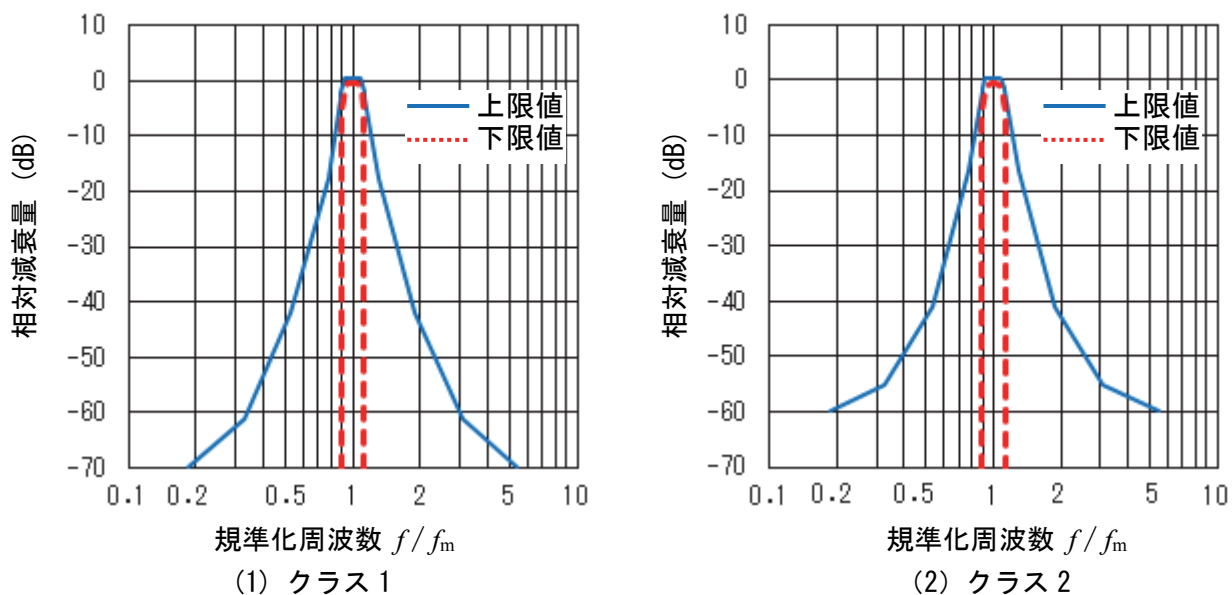


図 4.14 1/3 オクターブフィルタの減衰特性の許容偏差 (IEC 61260)

4.3 記録機器

4.3.1 データレコーダ

機械振動の記録は、振動計の AC 出力信号を収録する。収録・再生による測定は、変動する振動、一過性の振動あるいは単発の衝撃振動などを分析するときに特に有効である。振動の場合、3 方向の測定を行う機会が多く、多チャンネルのデータレコーダが使用される。以前はデジタルオーディオ・テープレコーダ (DAT) 方式が使用されていたが、最近ではメモ리카ードに直接記録する方式のデータレコーダが主流である。図 4.15 に 4ch データレコーダの例を示す。この場合、稼動部がないため非常に小型軽量にすることができ、電源も乾電池で動作する。また本体が振動してもデータ記録には影響しない。さらに、加速度ピックアップを直接接続することができ、振動計を使用しなくても加速度波形を記録することが可能になってきている。記録されたデータは、メモ리카ードを介して直接コンピュータに読み込むことができるので、コンピュータ上で動作するソフトウェアを利用して周波数分析や振動解析を容易に行うことができる。



図 4.15 4ch データレコーダ

5. 機械振動の評価

5.1 振動シビアリティ

振動シビアリティは、振動の激しさを包括的に表す量として定義される。振動する量の極大値、平均値、実効値または振動に関する他の尺度の値で示される。

機械の振動シビアリティは、最初はISO 2954¹¹⁾(回転機械及び往復動の機械振動：振動シビアリティ測定器の条件)において定義される振動シビアリティであり、測定周波数範囲が10 Hz～1000 Hzの振動速度実効値(mm/s)であった。しかしその後、適用範囲の拡大を意図したISO 10816シリーズ(非回転部分における測定による機械振動の評価)が制定された。この中では、測定周波数範囲は対象の機械によって設定される。また従来、振動シビアリティは新品の製品の品質管理に用いられることを主目的としていたが、このISO 10816シリーズは機械の使用過程、保守などに適応できるとしている。

5.2 振動シビアリティ測定器

回転機械および往復動機械の振動シビアリティ(10 Hz～1000 Hzの振動速度実効値)を測定するための測定器の規格ISO 2954¹¹⁾の翻訳規格としてJIS B 0907⁶⁾がある。振動シビアリティ測定器の周波数特性は、10 Hz～1000 Hzの周波数範囲では平坦特性、その範囲外の周波数においては-18 dB/oct.の減衰特性を与える(図5.1)。

備考

11) ISO 2954:Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery. Requirements for instruments for measuring vibration severity

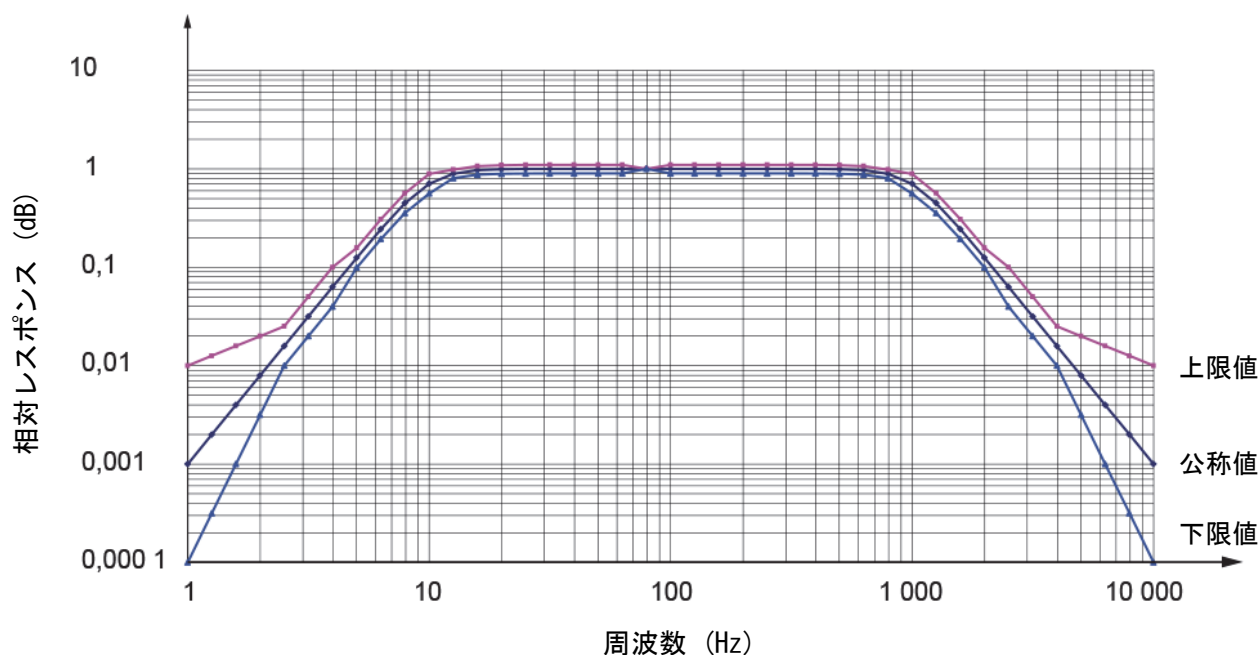


図 5.1 ISO 2954 による振動シビアリティ特性

5.3 振動シビアリティによる評価

振動シビアリティを用いて機械振動の評価を行う規格には、ISO 2372⁵⁾ (10~200 rev/sの機械、翻訳規格JIS B 0906¹²⁾)、ISO 3945¹⁴⁾ (大形回転機械)、ISO 2373¹⁵⁾ (軸高80 ~400 mmの電動機) および10816シリーズがある。

ただし現在、ISO 3945を除く規格は、ISO 10816シリーズに移行しているので新規に導入する場合は、ISO 10816を適用するとよい。ISO 10816-3:2009 の振動シビアリティの適用例を表5.1に示す。

表 5.1 ISO 10816-3:2009 の振動シビアリティの適用例

振動シビアリティ 適用例	グループ 2 中型機械 15 kW < 出力 ≤ 300 kW 160 mm ≤ モータシャフト高さ < 315mm		グループ 1 大型機械 300 kW < 出力 ≤ 50 MW 315 mm ≤ モータシャフト高さ	
	固定基礎	弾性支持	固定基礎	弾性支持
振動速度実効値 (mm/s)				
0.71	優 Good	優 Good	優 Good	優 Good
1.4				
2.3	良 Satisfactory	良 Satisfactory	良 Satisfactory	
2.8				
3.5	可 Unsatisfactory	可 Unsatisfactory	可 Unsatisfactory	良 Satisfactory
4.5				
7.1	不可 Unacceptable	不可 Unacceptable	不可 Unacceptable	可 Unsatisfactory
11.0				

備考

- 12) JIS B 0906:非回転部分における機械振動の測定と評価 一般的指針
- 13) ISO 10816-3:2009: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ
- 14) ISO 2373: Mechanical vibration of certain rotating electrical machinery with shaft heights between 80 and 400 mm - Measurement and evaluation of the vibration severity

5.4 ISO 10816 シリーズによる振動評価

ISO 10816シリーズは、次の8つのパートからなるが、今後、後続パートも検討される予定である。

- Part 1¹⁵⁾ : 一般的な指針
- Part 2¹⁶⁾ : 固定基礎の 50 MW を超える蒸気タービン発電機セット
- Part 3¹⁷⁾ : 公称出力 15 kW 以上、公称速度 120~15000 r/min の産業機械(現場測定)
- Part 4¹⁸⁾ : 航空機関連を除くガスタービン駆動セット
- Part 5¹⁹⁾ : 水力発電及びポンプ施設の機械セット
- Part 6²⁰⁾ : 100 kW 以上の出力定格をもつ往復機械
- Part 7²¹⁾ : 産業用ポンプ
- Part 8²²⁾ : 往復動コンプレッサシステム

備考

- 15) ISO 10816-1: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 1: General guidelines
- 16) ISO 10816-2 Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min
- 17) ISO 10816-3 Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ
- 18) ISO 10816-4 Part 4: Gas turbine sets with fluid-film bearings
- 19) ISO 10816-5 Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants
- 20) ISO 10816-6 Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW
- 21) ISO 10816-7 Part 7: Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts
- 22) ISO 10816-8 Part 8: Reciprocating compressor systems

ISO 10816-1は、軸受ハウジングのような非回転部分で測定される機械の振動の測定と評価について一般的な指針を定める基本の規格である。

一般的な評価基準は、機械の保証、安全、長期運転などを考慮して、運転のモニタリングと受入試験に関連した振動の大きさで表され、また運転限界も示されている。なお、振動ピックアップの非接触法で規定する ISO 7919 シリーズ²³⁾(大型機械の軸受振動の測定と評価基準)を必要に応じて併用する。

なお、ISO 10816 シリーズと ISO 7919 シリーズの統合作業が進められており、2016 年には ISO 10816-1 と ISO 7919-1 が統合された ISO 20816-1 が発行されている。

備考

- 23) ISO 7919-1: Mechanical vibration of non-reciprocating machines – Measurements on rotating shafts and evaluation criteria – Part 1: General guidelines
- ISO 7919-2 Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1 500 r/min, 1 800 r/min, 3 000 r/min and 3 600 r/min
- ISO 7919-3 Part 3: Coupled industrial machines
- ISO 7919-4: Part 4: Gas turbine sets with fluid-film bearings

ISO 10816-1 に記載されている主な内容を以下に示す。

(1) 周波数範囲

振動の測定は、機械の振動の周波数スペクトルが十分にカバーされるように、広帯域でなければならないとし、機械の種類別に定める。従来の振動シビアリティが10 Hz～1000 Hzの範囲内の広帯域振動速度[mm/s(rms)]としていたが、この規格のシリーズでは周波数範囲を固定しない。

(2) 測定量

測定量は、振動速度実効値に制限することなく、次のような量を用いることができる。

- a) 振動変位 (μm)
- b) 振動速度 (mm/s)
- c) 振動加速度 (m/s^2)

しかし、これまで経験的に振動速度実効値が振動エネルギーと関連するとしてきたので、振動変位や振動加速度で、かつ実効値の他の量で基準を設定するのは必ずしも簡単ではないとしている。

(3) 測定位置

測定は、軸受または軸受支持ハウジングや機械の動的な力に関係して主要な部分で、また全体の振動を特徴づけられる構造部分で行う。

各測定位置で測定する振動方向は、互いに直角な三つの方向であるが、運転モニタリングの場合には水平または直角の一つの方向でよい。

(4) 機械の据付方法

受入試験において、固定基礎の場合には、機械の脚部または軸受支持部に近い基礎枠や固定脚部における振動が軸受の振動の50%を超えなければ適切な据付と考えてよい。たとえば小型モータの場合には、機械は弾性支持板の上で行うことができるが、その支持系の固有振動数は機械の最低の主要振動数の1/2より低くなければならない。

運転モニタリングの場合には、公称運転状態で行う。

環境振動(暗振動)は、推奨される限度値の1/3より大きければ環境振動の低減の措置をとる。

(5) 測定器

用いる測定器は、温度、湿度などの環境を配慮して選定し、振動ピックアップは機械の振動特性に影響しないように取り付けられることを特に注意する。

測定器は、振動変位、振動速度、振動加速度などの実効値表示をできるもの、あるいはピーク値、p-p値も合わせて表示できるものである。

(6) 評価基準

次の代表的な評価ゾーンは、機械の振動を定性的に評価し、それに対応する際の指針を与える。

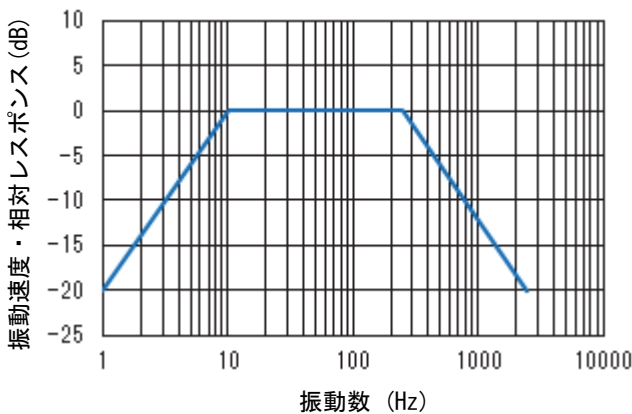
Zone A : 新たな製作を依頼する機械の振動は、通常、このゾーン内に入るであろう。

Zone B : このゾーン内の振動をもつ機械は、通常、長期運転が可能である。

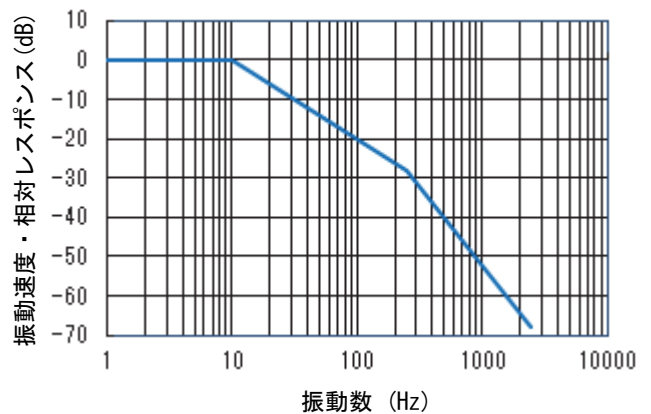
Zone C : このゾーン内の振動をもつ機械は、通常、長期連続運転には不相当と考えられる。一般に、機械は補修の適切な機会があるまで、この状態で制限される期間について運転してもよい。

Zone D : このゾーン内の振動値は、通常、機械に破損を生ずるに十分なシビアリティであるとされる。

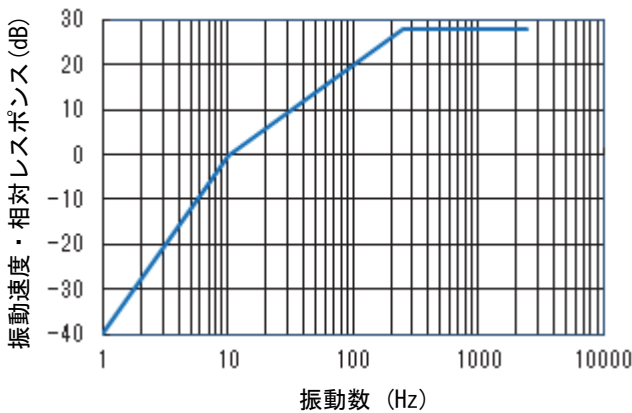
ゾーン境界の数値は、容認仕様ではなく、機械製造業者と顧客との間の合意を必要とすべきである。多くの場合、振動速度が機械運転速度の広い範囲にわたって振動のシビアリティを特徴づけるのに適していることが分かっている。しかし、特に低運転速度の機械が一回転ごとに一回の振動が顕著であるときには振動変位が適用できるが、振動速度による振動シビアリティは低振動数領域では振動変位を表現している。同様に、高運転速度あるいは機械要素部分による高振動数の振動を持つ機械では振動加速度の評価も必要な場合があるが、振動速度による振動シビアリティは高振動数領域では振動加速度を表現しているともいえる。



(1) 振動速度表示



(2) 振動変位表示



(3) 振動加速度表示

図 5.2 ISO 10816-6 の振動シビアリティを各測定量で表現した場合の特性

たとえば、ISO 10816-6の振動シビアリティは振動速度によって図5.2(1)のように規定されるが、これを振動変位および振動加速度によって表現すると図5.2(2)および図5.2(3)のようになる。すなわち、振動速度による振動シビアリティの測定量はmm/sであっても、低振動数領域(10 Hz以下)では振動変位を、中域(10~250 Hz)では振動速度を、高域(250 Hz以上)では振動加速度を主に表現しているとみることができる。

ISO 10816-1は、「特定の機械グループに関する暫定の広帯域振動基準」について、次のように分類し、表5.2を例示している。

表 5.2 代表的なゾーン境界限度値

Range of typical zone boundary values for non-rotating parts r.m.s. vibration velocity mm/s				
0,28				0,28
0,45				0,45
0,71				0,71
1,12	Zone boundary A/B 0,71 to 4,5			1,12
1,8				1,8
2,8		Zone boundary B/C 1,8 to 9,3		2,8
4,5				4,5
7,1			Zone boundary C/D 4,5 to 14,7	7,1
9,3				9,3
11,2				11,2
14,7				14,7
18				18
28				28
45				45
NOTE 1 This table only applies to machines for which specific International Standards have not been developed and for which there is no suitable experience available.				
NOTE 2 Small machines (e.g. electric motors with power up to 15 kW) tend to lie at the lower end of the range and large machines (e.g. prime movers with flexible supports in the direction of measurement) tend to lie at the upper end of the range.				

注： ISO 20816-1:2016 (Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines)参照。

附 録

基本的な振動理論

1. 正弦振動の合成

1.1 同じ振動数の正弦振動の合成

図 1 は、振動数と振幅が等しい二つの正弦振動の位相が 90° ずれている場合の合成振動を示す。この場合の振幅はもとの振動の位相と振幅によって決まるが、周波数は変化しない。二つの正弦振動の位相が一致したときには振幅は最大になり、位相が 180° ずれたときにはその合成はゼロになる。

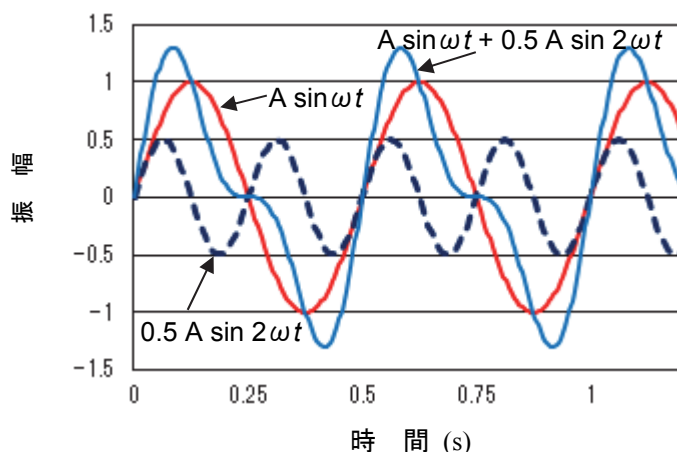


図 1 同じ振動数の正弦振動の合成

1.2 異なる振動数の正弦振動の合成

図 2 は、振動数の比が 2 および振幅の比が 2 である二つの正弦振動を合成したものである。異なる振動数の振動を合成すると、周期的であっても調和運動とはならず非調和運動となる。

1.3 うなり

わずかに異なる振動数をもつ二つの正弦振動の合成は、図 3 のようにうなり現象を生じる。うなり周期は振動数の差の絶対値である。同じ回転数の機械をいくつか同時に運転するとき、その構造物あるいは機械基礎部においてうなり現象を生じやすい。

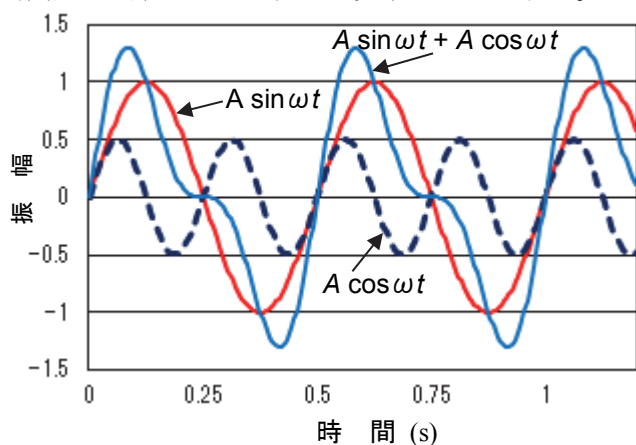


図 2 異なる振動数の正弦振動の合成

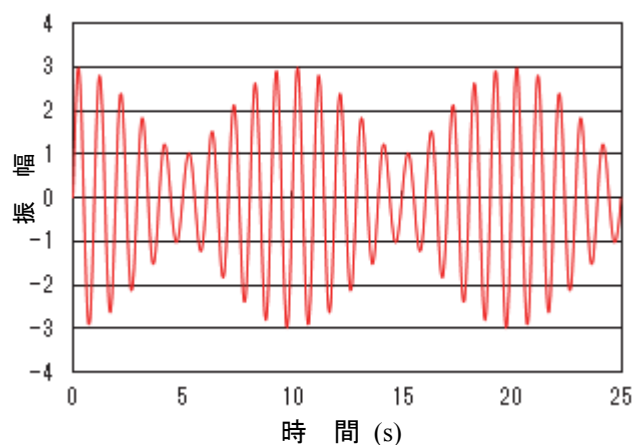


図 3 うなり

2. 1 自由度系

図4に示すような動かない基礎(天井あるいは床)に、ばねによって支持された質量の運動が上下方向に限られているとき、この系は1自由度の振動をする。

ばねのこわさ(ステフネス)は、ばねを1 m 伸ばすのに必要な力(ニュートン数)で定義されるばね定数 k (N/m)によって定まる。剛な基礎と質量の間には、油あるいは空気のダッシュポット(ダンパ、ピストン)があるものとする。このダッシュポットは、質量が動かないときはそれに力を伝えないが、質量が動きだせば振動速度に比例してそれと反対向きの減衰力 c を生じる。 c (N・s/m)の量は、粘性減衰係数(通常、減衰係数)という。

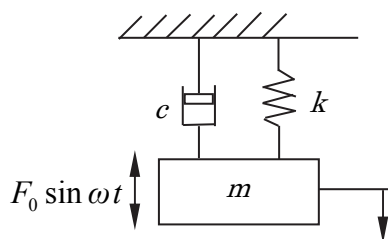


図4 1 自由度系

質量に $F_0 \sin \omega t$ の正弦的な外力を加えたとき、質量 m の運動は次のようになる。ばねの力は kx の大きさを持ち、フックの法則に従い力と伸びの関係は直線的である。ばねの力の符号は、ばねが上向きに引張るあるいは押し上げるとき変位は下向きであるから負である。すなわち振動変位 x が正のとき、ばねの力は負であるから、ばねの力は $-kx$ で表される。減衰力は、振動速度 \dot{x} に比例するが、 \dot{x} と反対の向きを持ち、 \dot{x} が下向き(正)のとき上向き(負)に働くから $-c\dot{x}$ で表される。

系全体として下向きには次の三つの力が質量に働く。

$$-kx - c\dot{x} + F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

ここでニュートンの運動法則(力=質量×加速度)から

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} + F_0 \sin \omega t \quad (2)$$

すなわち

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (3)$$

[慣性力+減衰力+ばね力=外力]

となり、この式が1自由度系の運動方程式といわれるものである。ここに、 \ddot{x} は加速度である。

ばねは図5のように並列あるいは直列に配列され、それぞれのばね定数は次式になる。

並列の場合
$$k = \sum_{i=1}^n k_i$$

直列の場合
$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1/k_i}$$

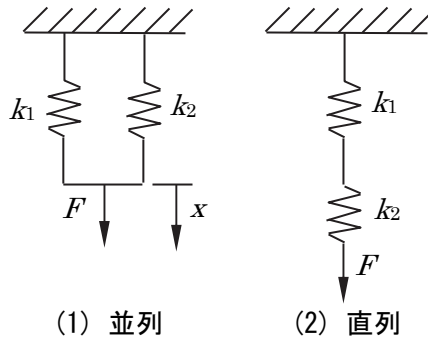


図5 ばねの配置

次に、図4において基礎が上下に $F_0 \sin \omega t$ で正弦運動をした場合は次のようになる。質量と動く基礎の間の相対変位を y で表すと

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_0 \sin \omega t \quad (4)$$

となり、式(3)と同じになる。

3. 振動ピックアップの原理

式(4)の関係は、サイズモ系(ケース、ばね、質量から構成される)振動ピックアップの原理である(図6)。つまり、振動ピックアップは接触部の振動がケースに伝わり、その振動はばねを通して質量に伝わるのであるが、あたかも接触部の振動が質量に直接作用するように働くのである。

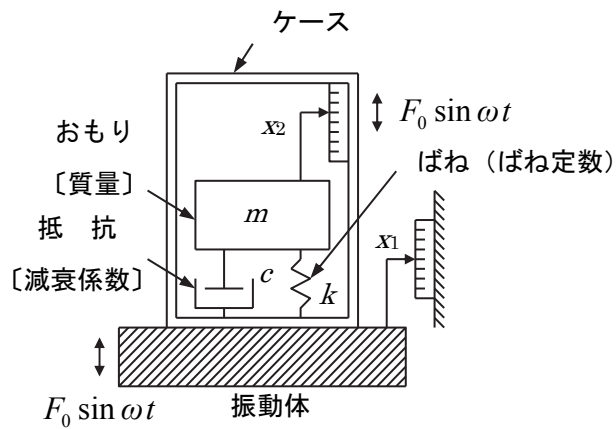


図6 サイズモ系振動ピックアップの原理

振動ピックアップの原理は、理論的には煩雑なものであるが、結果として次のように示すことができる。系の共振振動数を f_0 、加振の振動数を f とする。

(1) $f/f_0 \ll 1$ の領域

相対変位の振幅 x_2 は、振動体の振動加速度に比例する。相対変位が電気出力に比例する発電機構の振動ピックアップの場合は、振動加速度入力に対して電気出力が比例する加速度型ピックアップとなる。固有振動数 f_0 が高い振動数になるように圧電素子でサイズモ系のばねを構成している圧電式振動ピックアップがこれに相当する。

(2) $f/f_0 \gg 1$ の領域

固有振動数 f_0 が十分低くなるように構成して相対変位に比例する電気出力を得る機構とすれば、変位型ピックアップが構成される。

動電型振動ピックアップでは、コイルをよぎる磁束の変化に比例する出力電圧を得る。サイズモ系の f_0 は低く構成されており、本質的には変位型ピックアップの構成であるが、出力は変位の時間変化 (= 速度) に比例するため、速度型ピックアップである。

(3) $f/f_0 \cong 1$ の領域

速度型ピックアップとなる。

ただし、この方式の速度型ピックアップは実用化が困難である。

4. 1 自由度系の固有振動数

図 4 および式 (3) において減衰力のない振動の場合は、図 7 に示すように、質量を x_0 だけ引っ張って放すと減衰のない次式の振動を続ける。

$$x = x_0 \cos t \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

そのサイクルは $t\sqrt{k/m}$ が 360° すなわち 2π ラジアン変わるたびに繰り返す。

1 サイクルの時間、つまり周期 T_n は、

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot T_n &= 2\pi \\ T_n &= 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [\text{s}] \end{aligned} \quad (6)$$

となる。

$\sqrt{k/m}$ を ω_n で表し、固有角振動数という。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

T_n の逆数、すなわち固有振動数 f_n は、

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{Hz}] \quad (8)$$

上式から、質量 m を 2 倍にすれば振動は $\sqrt{2}$ 倍だけゆるやかに、あるいは m をそのままにしてばねを 2 倍軟らかくすれば $\sqrt{2}$ 倍だけゆるやかに、つまり固有振動数は 0.71 倍だけ低くなる。ばねの上に質量 m の物体を静かに載せたときのたわみ、すなわち静的たわみを δ とすると、 g を重力の加速度 ($g=9.8 \text{ m/s}^2=980 \text{ cm/s}^2$) として $k\delta = mg$ 、すなわち $k = mg/\delta$ であるから、 f_0 は

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mg/\delta}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

となり、 δ を cm で表示すると

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{980}{\delta}} \doteq \frac{5}{\sqrt{\delta}} \quad [\text{Hz}] \quad (10)$$

となる。

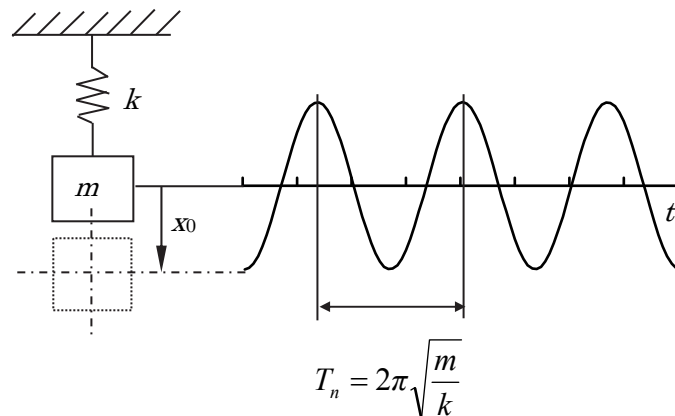


図7 減衰のない1自由度系の振動

5. 減衰のある自由振動

減衰のない自由振動は永久に続くことになるが現実には起こりえない。自由振動は通常は何らかの減衰力の影響によりたとえば図 8 のように時間とともに減少する。式(3)において外力のない場合には次式となる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (11)$$

減衰係数 c が 0 なら減衰のない振動になり、 c が 0 から大きくなるに従って次第に減衰の大きな振動となる。ある値 c_c 以上の抵抗になると、振動性がなくなりゆっくりと元の位置に戻るようになる。この c_c を臨界減衰係数といい、 c/c_c を減衰比という。減衰比は通常 ζ で表す。

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (12)$$

また、 c_c は次式で表される。

$$c_c = 2\sqrt{mk} = 2m\omega_0 \quad (13)$$

減衰のある系の固有振動数は、減衰のない系の固有振動数より $\sqrt{1-\zeta^2}$ 倍となり、周期は

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega_0\sqrt{1-\zeta^2}} \quad [\text{s}] \quad (14)$$

で表される。

図 8 のような減衰振動の各振幅の割合を表すのに次式の対数減衰率 Δ を用いる。

$$\Delta = \log_e \frac{x_n}{x_{n+2}} \quad (15)$$

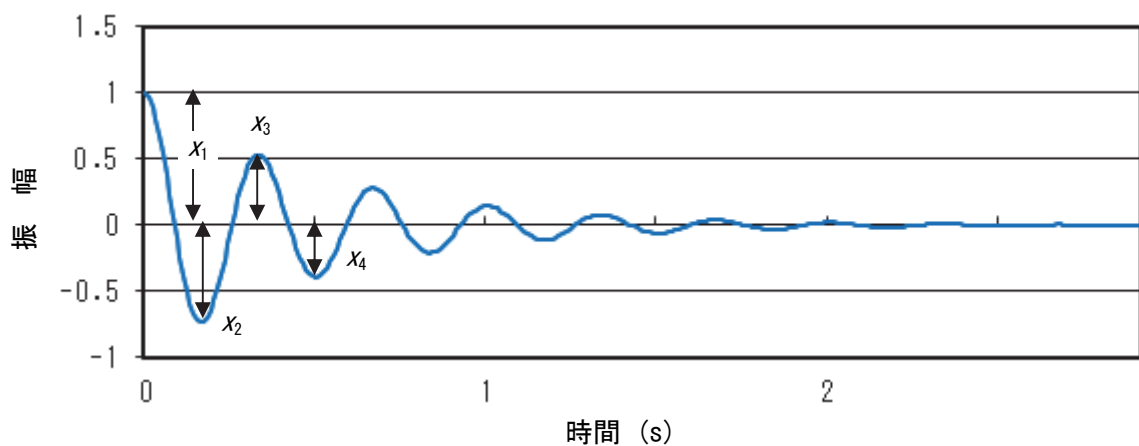


図 8 減衰自由振動

6. 強制振動の性質

振動の系にある種の脈動的な乱れを与え、その系が振動することを強制振動という。たとえば、図9のようにゴム紐に適当なおもりを付け、手をゆっくりと上下に動かしてみる。そのとき、おもりは手の動きと同じに上下する。次に手を少し速く手を上下させると、おもりは手の動き以上に大きく上下する振動が見られるようになる。さらに速く手を動かすと、おもりは手の動きについていけずに停止する状態が見られる。これが強制振動の性質である。また、これは弾性支持による防振の原理でもある。

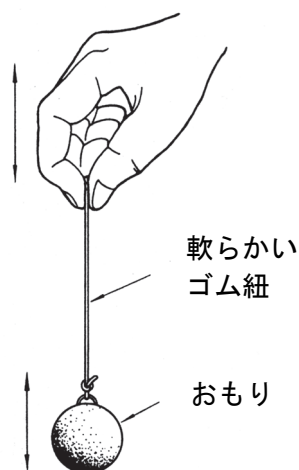


図9 強制振動の例

7. 減衰のない強制振動

1自由度系の運動方程式(3)の減衰の項 $c\dot{x}$ がゼロのときが減衰のない強制振動である。

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (16)$$

この解の強制力による変位 x は次式になる。

$$x = \frac{F_0/k}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \sin \omega t \quad (17)$$

ここに、 F_0/k は一定の荷重 F_0 が作用するときのばねの静的たわみである。静的たわみを x_{st} としたとき、

$$\frac{x}{x_{st}} = \frac{1}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \sin \omega t \quad (18)$$

となる。この振動中の変位振幅を x_0 とおき x_{st} との比の絶対値を振動倍率(変位振幅倍率)という。

$$\frac{x_0}{x_{st}} = \left| \frac{1}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right| \quad (19)$$

なお、 $\omega/\omega_n < 1$ の範囲内では外力と質量の運動は同位相であり、 $\omega/\omega_n > 1$ のときは逆位相である。

8. 減衰のある強制振動

減衰のある強制振動の振動倍率は次式で与えられる。

$$\frac{x_0}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (20)$$

9. 振動伝達率

機械を弾性支持された機械を質量 m とし、それに外力が加わり、防振装置のばね k を介して基礎に力が伝達する力は、そのばねの抵抗分と変形による力の和である。この伝達される力と加振力との比を振動伝達力 τ といい、次式で表され、また図 10 のようになる。

$$\tau = \sqrt{\frac{1 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (21)$$

なお、減衰が無視できる場合には、次式となる。

$$\tau = \left| \frac{1}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right| \quad (22)$$

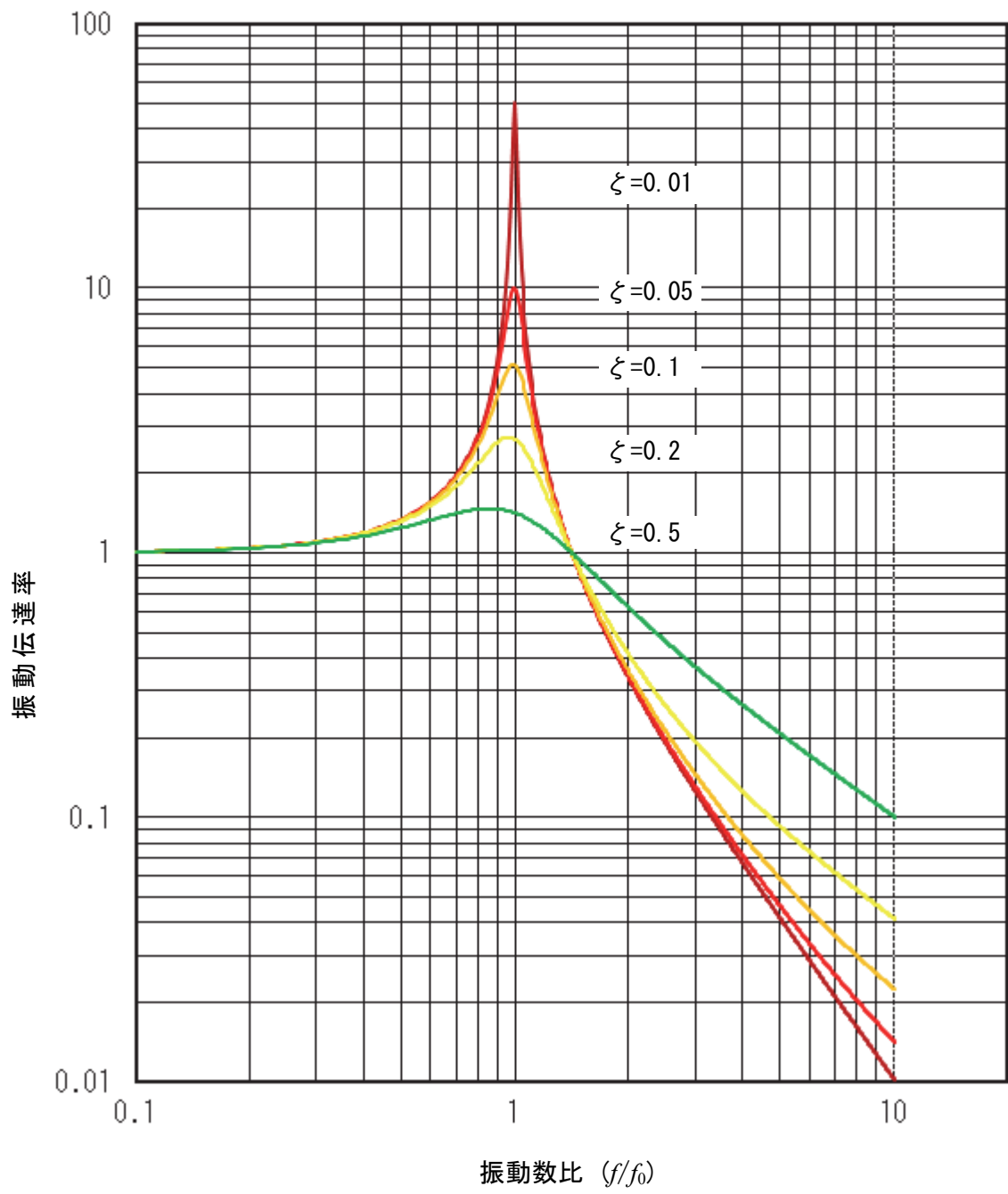


図 10 振動伝達率



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

本社／営業部

東京都国分寺市東元町3丁目20番41号

〒185-8533

TEL (042) 359-7887(代表)

FAX (042) 359-7458

西日本営業所 大阪市北区梅田2丁目5番5号 横山ビル6F

〒530-0001 TEL (06) 6346-3671 FAX (06) 6346-3673

東海営業所 名古屋市中区丸の内2丁目3番23号 和波ビル

〒460-0002 TEL (052) 232-0470 FAX (052) 232-0458

九州リオン(株) 福岡市博多区冷泉町5番18号

〒812-0039 TEL (092) 281-5366 FAX (092) 291-2847