

圧電型加速度計・振動用前置増幅器

ハンドブック



Brüel & Kjær 

**圧電型加速度計・振動用前置増幅器  
ハンドブック**

**by**

***Mark Serridge, BSc***

**and**

***Torben R. Licht, MSc***

**Revision November 1987**

# 目 次

1. 振動の測定	1
1.1 序	1
1.2 なぜ振動を測るか	1
1.3 振動とは	5
1.4 振動のパラメータ	6
1.5 振動レベルの定量化	7
振幅と周波数のリニア目盛	9
振幅と周波数の対数目盛	9
1.6 振動測定結果の解析	11
2. 圧電型加速度計	12
2.1 序	12
2.2 加速度計の動作	13
加速度計の動作の解析	14
2.3 周波数レンジ	18
上部周波数限界	19
下部周波数限界	20
2.4 圧電材料	20
2.5 加速度計の実際の構造	22
ラインドライブ型加速度計	24
その他の型の構造	25
2.6 加速度計の感度	25
電荷と電圧感度	26
ユニゲイン® の感度	28
リニアリティとダイナミックレンジ	28
横方向感度	29
2.7 位相応答	32
2.8 過渡応答	33
漏洩効果	33
リングング	35
ゼロ点移動	37
3. 振動測定用プリアンプ	38
3.1 プリアンプの種類と働き	39

3.2	チャージ型プリアンプ	39
	チャージ感度	40
	下限周波数	44
	加速度計のケーブルによる入力側の容量負荷	48
	電荷の減衰	49
	チャージアンプ内のノイズ	50
3.3	電圧プリアンプ	54
	電圧感度	55
	下限周波数	56
	電圧プリアンプのノイズ	57
3.4	プリアンプの出力ケーブル	57
3.5	ラインドライブシステム	58
	B&K社のラインドライブ加速度計とラインドライブ電源	61
	B&K社のラインドライブアンプとラインドライブ電源	61
3.6	外部ノイズに対する種々のプリアンプの感度比較	61
	接地された加速度計とチャージプリアンプ	64
	接地された加速度計と浮動入力付チャージアンプ	65
	B&K社のラインドライブアンプと電源（接地入力）	66
	B&K社のラインドライブ加速度計と電源（“浮動”入力）	68
	定電流電源によるラインドライブシステム	69
	平衡形加速度計と差動チャージアンプ	70
	加速度計の絶縁取り付けがノイズに及ぼす影響	71
3.7	プリアンプに付加される機能	72
	積分回路	72
	フィルタ	76
	過負荷インジケータ	78
	基準用発振器	78
	電 源	78
4	加速度計の実用上の性能	79
4.1	序	79
4.2	環境の影響	80
	使用温度範囲	80
	温度の過渡的变化の影響	82
	音の影響	84
	基部のひずみの影響	85
	湿度の影響	85

	磁界の影響	86
	放射線の影響	86
4.3	加速度計の質量付加効果	86
4.4	加速度計の固定法	88
	振動測定物の表面の仕上げ条件	89
	取付場所	89
	固定法による加速度計の周波数応答の変化	90
	ネジによる固定法	90
	ワックスによる固定法	93
	磁石による固定法	95
	接着ディスクによる固定法	97
	接着法	98
	プローブ	102
4.5	メカニカルフィルタ	105
	説明	105
	性能と使用法	106
4.6	加速度計用ケーブル	107
4.7	接地に関する注意	109
5.	加速度計の校正と検査	111
5.1	序	111
	なぜ加速度計を校正するか	113
5.2	校正規格の階層構造	114
	階層の全体像	114
	B&K社の校正の階層構造	115
	校正方法の精度	118
5.3	校正方法	119
	レーザー干渉法	119
	その他の絶対校正法	121
	back-to-back法による比較校正	121
	F F Tを用いたback-to-back校正法	123
	校正済み加振器を使用した感度チェック	124
5.4	加速度計のその他のパラメータの測定	125
	横方向感度	125
	周波数応答	126
	固有振動数	128
	キャパシタンス	129

5.5	加速度計の性能に対する環境の影響の決定	129
	過渡的溫度変化に対する感度	129
	溫度変化に対する感度	130
	基部ひずみに対する感度	130
	音に対する感度	131
	磁界に対する感度	131
	溫度の限界	132
	衝撃の限界	132
5.6	加速度計ケーブルの製品検査	132
5.7	校正用機器	133
	9559型 校正システム	133
	校正用機器の要約	133
5.8	加速度計の校正に関する規格	134
6.	付録	137
	付録A 単位変換表	138
	" B 振動のノモグラム	141
	" C 振動規格	142
	" D 振動に関するB&K社の参考書	142
	" E B&K社のプリアンプの要約	144
	" F B&K社のプリアンプ組み込み機器の要約	146
	" G B&K社の加速度計の周波数と ダイナミックレンジのチャート	148
	" H B&K社の加速度計の要約	150

## SYMBOL NOTATION

### General Quantities

- $t$  = Time  
 $f$  = Frequency  
 $\omega$  = Angular frequency  
 $j$  =  $\sqrt{-1}$   
 $e$  = Base to the Natural Logarithm

### General Dynamics

- $x$  = Displacement  
 $v$  = Velocity  
 $a$  = Acceleration  
 $F$  = Force  
 $T$  = Period  
 $\tau$  = Time constant

### Accelerometer Dynamics

- $m_s$  = Seismic mass  
 $m_b$  = Mass of base  
 $x_s$  = Displacement of seismic mass  
 $x_b$  = Displacement of base  
 $F_e$  = Excitation force  
 $\omega_n$  = Natural resonance frequency (rads/sec)  
 $\omega_m$  = Mounted resonance frequency (rads/sec)  
 $f_m$  = Mounted resonance frequency (Hz)  
 $A$  = Amplification factor  
 $Z_s$  = Mechanical Impedance of structure  
 $Z_a$  = Mechanical Impedance of accelerometer

### General Electrical Quantities

- $I$  = Current  
 $V$  = Voltage  
 $Q$  = Charge  
 $C$  = Capacitance  
 $R$  = Resistance  
 $Z$  = Impedance

## SYMBOL NOTATION

### Accelerometer Electrical Quantities

- $V_a$  = Open circuit accelerometer voltage  
 $Q_a$  = Charge generated by piezoelectric elements  
 $C_a$  = Capacitance of accelerometer  
 $R_a$  = Resistance of accelerometer  
 $S_{qa}$  = Charge sensitivity of accelerometer  
 $S_{va}$  = Voltage sensitivity of accelerometer (loaded)  
 $S_{vao}$  = Voltage sensitivity of accelerometer (open circuit)  
 $C_h$  = Capacitance to the housing of a balanced accelerometer from the output pins

### Cable Electrical Quantities

- $C_c$  = Capacitance of cable  
 $R_c$  = Series resistance of cable  
 $R_b$  = Resistance between centre conductor and screen  
 $C_s$  = Capacitance between screen and inner conductors in balanced accelerometer cable  
 $C_d$  = Capacitance of dielectric in balanced accelerometer cable  
 $q_n$  = Triboelectric charge noise

### Preamplifier Electrical Quantities

- $R_p$  = Preamplifier input resistance  
 $C_p$  = Preamplifier input capacitance  
 $C_f$  = Feedback capacitance  
 $R_f$  = Feedback resistance  
 $A$  = Gain of operational amplifier  
 $V_i$  = Preamplifier input voltage  
 $V_o$  = Preamplifier output voltage  
 $Z_f$  = Feedback impedance  
 $Z_t$  = Total impedance of accelerometer, cable and preamplifier input  
 $I_i$  = Current from  $C_f$   
 $I_c$  = Current through feedback capacitor  
 $V_c$  = Voltage across feedback capacitor  
 $C_t$  = Total capacitance of accelerometer, cable and preamplifier input  
 $R_t$  = Total resistance of accelerometer, cable and preamplifier input  
 $R_{float}$  = Resistance of "floating" stage of preamplifier  
 $CMRR$  = Common Mode Rejection Ratio of "floating" operational amplifier  
 $e_n$  = Noise voltage  
 $i_n$  = Noise current  
 $R_o$  = Output resistance of line-drive amplifier



# 1. 振動の測定

## 1.1 序

近年、構造物が精巧かつ複雑になり、機械が高速かつ複雑になるとともに振動の問題が注目を引きはじめた。この問題は装置のランニングコストを低減し、効率上昇させようとする要求に関連している。一方ではこれは雑音や振動が人に及ぼす影響や製品の寿命にも深い関係がある。そのため、振動源や構造物の動的応答を追求する必要がある。それには、高精度で信頼性のある汎用の振動変換器が必要であり、高性能、高機能の振動測定および分析機器が用いられる。しかしながら、いかに機器が汎用的で性能が高くても、信頼できる変換器からの正しい振動信号がなくては役に立たない。

圧電型加速度計は振動変換器として最適のものである。現在非常に多くの高性能の測定機があるが、このタイプの変換器を使用すれば、非常に広い周波数レンジとダイナミックレンジの測定ができる。

このハンドブックはブリュエル・ケアー社(以後、B&K社と言う)の圧電型加速度計を用いて精度の良い振動測定をするための実用的な手引書である。

## 1.2 なぜ振動を測るか

振動を測定する理由は沢山ある。一般に言って、制御出来ない振動は、騒音の原因であったり、機械の故障の原因となるような応力を発生させる好ましくない現象である。振動測定には大きく分けて次の4つの分野がある。

1. 振動テスト 一般的な環境試験の一部あるいは技術的設計の一部として、構造物が使用される環境に発生する振動に対する耐性を調べるために行われる。振動テストの間、構造物(たとえば航空機の部品)は加振器によって激しい振動にさらされる。振動のレベル

は定められた周波数範囲で一定に保たれ、周波数を順次変えてゆく。これを加振器のコントローラとフィードバック用加速度計(加振台の振動のデータを送る)によって行う。さらに第2の加速度計を構造物に取り付け周波数応答の測定を行う。

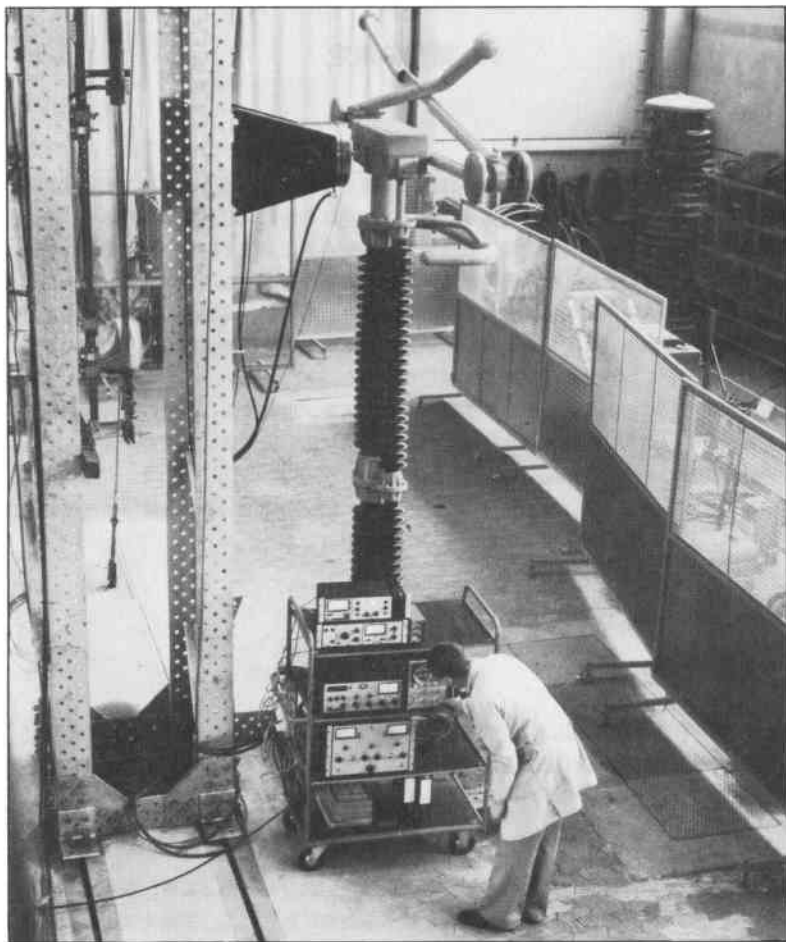


図1.1 高電圧鉄塔に使う絶縁体の振動テスト。

2. マシンヘルスマニタリングと故障診断 機械のオーバーオール振動レベルを測定し、故障の発生の警報を出す方法が行われている。しかし、振動の周波数分析をする等の方法でさらに多くの情報が得られる。この技術では、最初に正常な状態の機械の振動の周波数スペクトルの変化を検出する。このスペクトルの変化は多くの場合、何か変化が起きている事を意味している。同様な方法で故障診断もできる。工場では、回転機の釣合いをとるために振動測定が必要である。不釣合いは大振動の原因の一つで、疲労やベアリング破損を引き起こす。

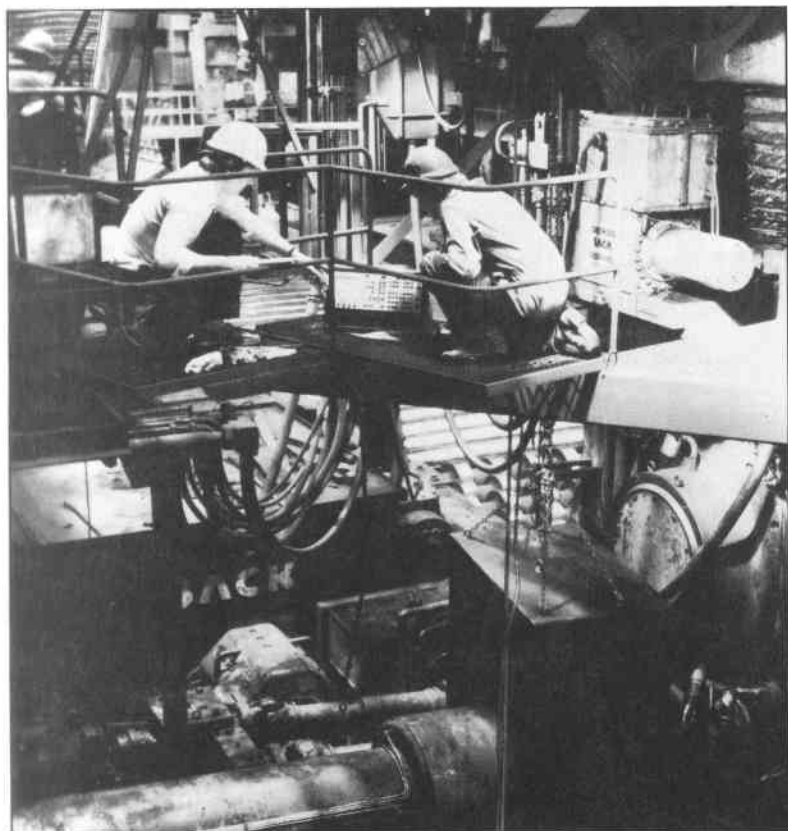


図1.2 機械の状態モニタリングと故障診断のために振動測定が行われる。

3. 構造の解析 構造物の動的挙動を調べるために振動を測定する方法は非常に重要な実験手法である。力変換器と加速度計を使って、加振信号と振動応答を同時測定した信号を振動解析器単独またはデスクトップ・コンピュータで高速処理し、重要な情報を得ることができる。この情報は、大は橋梁から小はタービン翼まであらゆる構造物の設計の検討や修正をするのに役立つ。



図1.3 振動測定による車両の構造の解析。

4. 人体の振動測定 この分野は人体へ伝達される振動を測定する。たとえば客車や手持ちの動力工具から発生する振動がその対象になる。振動の測定結果は快適性や健康に関する国際規準と比較される。



図1.4 加速度計と振動計を使ってチェーンソーのハンドルの振動レベルを測定している。

### 1.3 振動とは

振動とは平衡位置前後を往復運動する動的現象である。振動は一つまたは複数の力の作用によって構造物中のエネルギーが移動、蓄積されることによって発生する。振動は機械運動の副産物としてしばしば発生し、これを除くことは非常に難しい。振動は振幅の時間

変化の形で時間領域で観察できる。振動の時間変化は数学的あるいは統計的に定義される表現の一つである。振動はまた、周波数領域から見ることもできる。その場合、振動はスペクトルで表現される。上記2つの領域は数学的にはフーリエ変換で結ばれている。興味があればこの問題に関するB&K社発行の小冊子“周波数分析”をごらん下さい。他の種類の振動変換器と違って、圧電型加速度計はあらゆるタイプの振動計測に利用されその有効周波数範囲、ダイナミックレンジ内ならば時間領域、周波数領域における振動の性質を問わない。圧電型加速度計の周波数およびダイナミックレンジは広いので、どんな振動測定対象に対しても適した性能のものが得られる。解析技術の方は振動のタイプに応じて変わる場合が多い。

#### 1.4 振動のパラメータ

圧電型加速度計は加速度を測定するので、振動速度を得るには1回、振動を得るには2回電氣的に積分する。これは圧電型加速度計の魅力的な面である。

図1.5に電動ドリルの加速度を積分した効果を示す。振動は周波数領域で表されている積分器はローパスフィルタとして働き、積分前にあった高周波数成分は減衰している。積分回路を使って不要な振動の情報を効率的に除いているのである。もちろんこのように言えるのは、高周波数成分が不必要な場合だけである。

特に積分する必要のない場合は常に加速度を用いるべきである。たとえば速度を測定する目的は言うまでもなく振動速度の大きさを知りたいときである。また、ふつう測定機器のダイナミックレンジに対する要求を小さくし、SN比を増やすことが望まれる。この要求に対しては周波数スペクトルが平坦であればあるほど良い(図1.5(b)参照)。振動に含まれる周波数成分を明らかにするには周波数分析をする以外に方法はない。回転機器の広帯域(周波数スペクトルの拡がり大きい)測定では振動の速度を測定するのが良い場合が全体の70%、加速度が適しているのは30%であり、変位は皆無である。変位測定が使われるのは低周波数、大変位の振動が起こる船や建物や橋のような場合である。

衝撃やインパルスのような複雑な信号の測定では、積分回路を使ってはいけない。なぜなら積分によって位相誤差が入り、振動の最大値等に大きな誤差となって現れるからである。

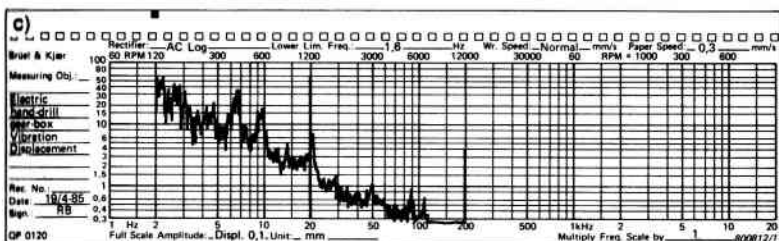
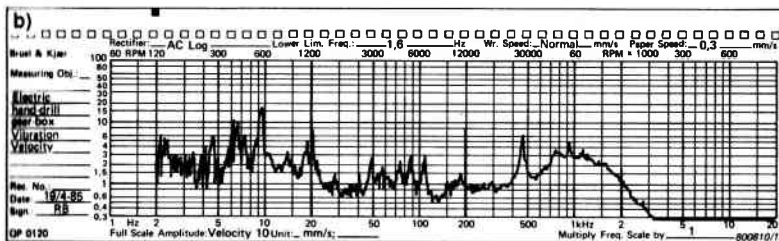
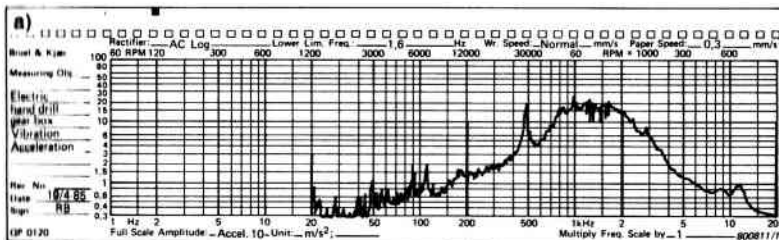


図1.5 加速度、速度、変位による電気ドリルの振動の周波数分析。

## 1.5 振動レベルの定量化

時間領域で信号の振幅を定量的に表現するいくつかの方法がある。この節で使っている単位は広く使われているものであるが、別の単位で測定される場合（たとえば $\text{in/s}^2$ 、 $\text{m/s}^2$ 、 $g$ 等）もある。

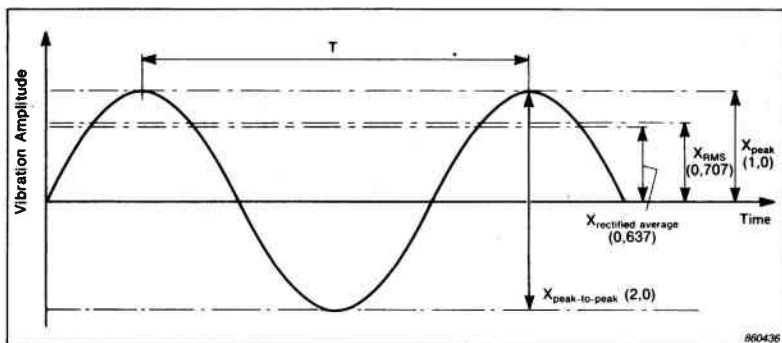


図1.6 簡単な高調振動。振幅は変位、速度、加速度を表す。

図1.6は、最も単純な振動の時間領域表現である。このような振動は一定時間間隔で全く同じ運動をくりかえす粒子の振動として表現される。この一定時間間隔は振動周期 $T$ と呼ばれる。振動の振幅は正弦波状に変化している。この振動の形と周期は振動を加速度、速度あるいは変位で表わしても変わらず、それら相互の位相が違うだけである。

図1.6の振動信号の振幅を表現するものに次の量がある。

1. **RMS(Root Mean Square)レベル** これは最もよく使われる振動レベルの指標である。振動レベルの2乗の時間平均値の平方根は振動のエネルギーに関係があり、振動の障害能力を表すとも言える。正弦波のRMS値はそのピーク値の $1/\sqrt{2}$ 倍である。
2. **ピーク値** ピーク値は測定値の最大値として定義され、衝撃の尺度として有効である。しかし、振動の時間的な性質には無関係である。
3. **ピーク振幅** 振動の変位の程度をあらわすのに使われることがあるが、この量はあまり利用されない。
4. **平均レベル** 振動の時間的変動も考慮した量であるが振動の物理的性質を表現するのに役立つ量との間に有効な関係はない。図1.6に正弦波を整流した場合の平均値を示す。



**5. クレストファクタ(波高値)** ピーク値のRMS値に対する割合である。RMS値の定義から正弦波のクレストファクタは  $\sqrt{2}$  である。振動がインパルスあるいはランダムになればなるほどクレストファクタは増す。この値はRMS値とピーク値の測定機能のある簡単な振動計があれば計算できる。機械の軸受箱の広帯域振動測定では特定の周波数成分がベアリングの欠陥のために増加してもRMS値測定からは検出できないがクレストファクタの成長をモニタにしていれば、故障や要素の欠陥を予測できる。

クレストファクタの利用のもう一つの例は構造検査の分野である。入力信号のクレストファクタは加振力に関する重要な情報を明らかにする。ハンマで打つような非常にクレストファクタの高い加振力の場合、構造物は非線形な応答を示すだろう。またクレストファクタが高いということは、SN比の高い応答を得るには入力エネルギーが十分でないことを意味している。一方、高いクレストファクタの入力は周波数領域の広い成分を含んでいる。

### 1.5.1 振幅と周波数リニア目盛

高い分解能が要求されるときはリニアな振幅や周波数目盛が使われる。リニアな周波数目盛では接近した周波数成分を区別しやすい。また一定周波数間隔で現れるハーモニックを一目で認識出来る点も長所である。

### 1.5.2 振幅と周波数の対数目盛

圧電型加速度計は極めて広いダイナミックレンジと周波数レンジを持っている。そのため測定結果を有効に表現するために次のような事がしばしば必要となる。

1. 最低検出振幅から高い衝撃値までを同時に表示できると同時に、相互の比較が容易な振幅の目盛。
2. 記録紙の上で一定パーセントの分解をもつ周波数目盛。

上記の2つの要求は、次の目盛を使うことによって満たされる。

1. デシベル目盛り 音響分野で最もよく用いられるデシベル (dB) は振動測定にも有用である。これはある値に対する振動振幅の割合を対数目盛で表現したものである。振動振幅の比率については、次のような関係がある。

$$\begin{aligned} N(\text{dB}) &= 10 \log_{10} \left( \frac{a^2}{a_{\text{ref}}^2} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left( \frac{a}{a_{\text{ref}}} \right) \end{aligned}$$

ここで

$N$  = デシベル値

$a$  = 測定された振動振幅

$a_{\text{ref}}$  = 基準振幅

ISO1683によれば基準振幅は次のとおり

加速度 =  $10^{-6} \text{ms}^{-2}$

速度 =  $10^{-9} \text{ms}^{-1}$

変位 =  $10^{-12} \text{m}$

1秒間に角速度1000ラジアン(約159Hz)の正弦波(約159Hz)のについて、これらの基準値は等価である。振動レベルをdBで表す場合には、「振動レベル110dB (基準値 $10^{-6} \text{ms}^{-2}$ )」のように基準値を比較する場合には、同じ基準値を使っている限り、デシベル値の差を使うことが出来る。たとえば、「ある振動は他の振動より20dB高い。」等のように基準値なしで表現してよい。

2. 対数周波数目盛 周波数はよく対数目盛でプロットされる。この目盛では低周波数レンジを拡大し、高周波数レンジを圧縮して表わす効果がある。そして、周波数軸上での相對精度が一様になり、目盛の寸法が手頃な割合に保たれる。こうして対数目盛を使えば広い周波数範囲がカバーできる。

## 1.6 振動測定結果の解析

従来は時間領域における解析から得られる情報は限られていたが、現在の解析技術はもっと有力になってきている。しかしながらアナログ又はデジタルの周波数分析器を用いた場合、もっと役に立つ情報が得られる。この小冊子ではこのような分析器についてくわしい話はしない。周波数分析分野の理論的基礎についてはB&K社発行の「機械振動と衝撃の測定」や「周波数分析」が参考になる。どんな種類の測定器があるかについてはB&K社の総合カタログ又は、ショートカタログをご参照下さい。

測定機器や結果の解析法には多種多様なものがある。しかし、どんな場合でも正しい信号でなければどんな解析をしても結果の信頼性は低いという事を考慮すれば、振動変換器は測定系の中でも最も重要なメンバーである。最も信頼性が高く、適用対象が広くかつ、正確な振動変換器は圧電型加速度計である。

## 2. 圧電型加速度計

### 2.1 序

本章では、圧電型加速度計の性質と使用方法に関する基本的な事項を理論的な面も含めて説明する。加速度計の使用法の性質から、振動計に使うプリアンプの性能に関しても少し触れる。しかし、プリアンプの使い方と性質に関する完全な説明は第3章「振動計のプリアンプ」で行う。B&K社の加速度計の品揃えについてはAppendix Hにある。

圧電型加速度計は振動の絶対測定に最も適した変換器であると認められている。それは下記に挙げる特性による結果である。

1. 非常に広い周波数領域で使用できる。
2. 非常に広いダイナミックレンジにわたり直線性が優れている。
3. 加速度信号を電氣的に積分して振動の速度と変位が得られる。
4. あらゆる環境条件下でも優れた精度で振動測定できる。
5. 外部電源が不要である。
6. 可動部分がなく耐久性がある。
7. 非常に小型で質量感度比が高い。

これらの長所をよく理解するために、他のタイプのいくつかの振動変換器や振動計測定の特性を調べてみよう。

1. **近接型プローブ** これは振動の相対変位を測定するデバイスです。これは静的変位も測定でき、出力は低インピーダンスです。しかしながら、外部から電力を供給する必要があり、高周波数域での性能は高い。さらに振動面は導体でなくてはならない。

2. 容量型プローブ 高感度で広い周波数帯域で使用できる小型非接触の変位変換器。しかしながら、振動面は導体でなくてはならないという条件があり、その上ダイナミックレンジが狭くかつ較正が難しい。
3. 位置ゲージメータ 安価で低インピーダンスのデバイスで静的変位が測定できる。しかし、ダイナミックレンジと周波数レンジは狭く、寿命が短く分解能は低い。
4. 圧電抵抗変換器 振動の加速度変換器で静的変位を測定できる。周波数レンジとダイナミックレンジは広いが、衝撃に弱い。耐衝撃性を向上させるために粘性ダンパが使われるが、そのために使用温度範囲が狭くなり、位相特性が変わってしまう。
5. 可動コイル 外部電源を要せず、低インピーダンスの振動速度変換器である。周波数レンジとダイナミックレンジは極めて狭く、磁場の存在やその方向に影響される。

## 2.2 加速度計の動作

図2.1にB&K社のデルタシェア® (Delta Shear) 加速度計の機械的構造を示す。加速度計の能動的要素は圧電電気素子 (piezoelectric element) である。これらは加速度計のペー

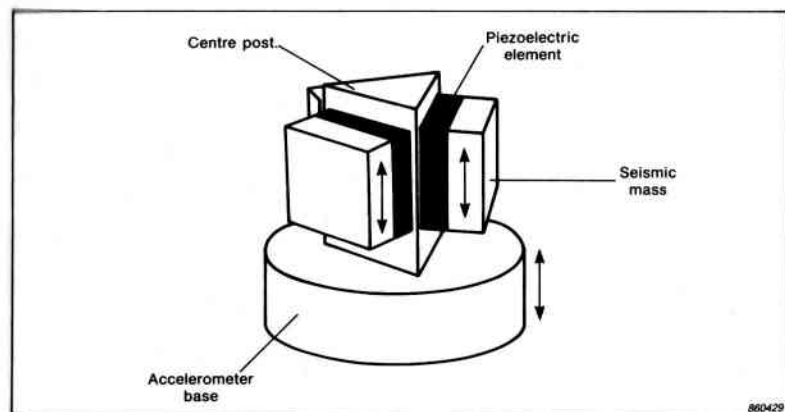


図2.1 ブリュエルキアー社のデルタシェア® 圧電型加速度計の構造。

スと重錘(Seismic mass)の間を三角形の中心柱を経て、結合するスプリングの役をしている。加速度計が振動すれば重錘とそれに作用する加速度の積に等しい力が、圧電素子に作用する。そして圧電素子は加わった力に比例する電荷を生じる。質量は一定であるから、結局、素子には加速度に比例した電荷が生じる。重錘の振動の加速度の大きさと位相は広い周波数レンジにわたり加速度計のベースのそれと同じであるからベースの加速度すなわち加速度計が取付けられた面の加速度に比例した出力が得られる。

図2.2に上述のモデルを示す。

## 2.2.1 加速度計の動作の解析

図2.2 は前節で述べた加速度計の簡単なモデルで慣性系と呼ばれている。図中の2つの質量は固定されず理想バネで結ばれている。B&K社の加速度計では減衰は非常に小さいので減衰項は省略してある。

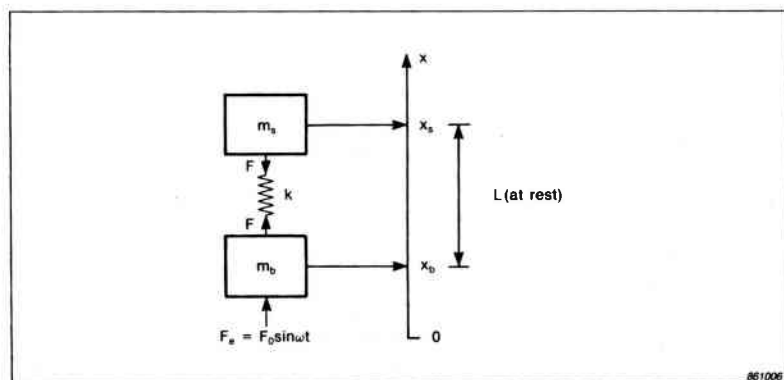


図2.2 加速度計の簡単なモデル。

- $m_s$  = 重錘の全質量
- $m_b$  = 加速度計のベースの質量
- $x_s$  = 重錘の変位
- $x_b$  = 加速度計のベースの変位

- $L$  = 加速度計が静止しているときの重錘と加速度計のベース間の距離  
 $k$  = 圧電素子の等価剛性  
 $F_e$  = 正弦波状の加振力  
 $F_0$  = 加振力の振幅  
 $\omega$  = 加振角周波数 (rad/s) =  $2\pi f$   
 $\omega_n$  = 加速度計の自然共振角周波数 (rad/s)  
 $\omega_m$  = 加速度計の取付け状態の共振角周波数 (rad/s)  
 $f_m$  = 加速度計の取付け状態の共振周波数 (Hz)  
 $f$  = 加振周波数 (Hz)

モデル中の力は次のように表現される。

$$F = k(x_s - x_b - L) \quad (\text{バネの力})$$

$$m_b \ddot{x}_b = F + F_e \quad (\text{ベースにかかる力})$$

$$m_s \ddot{x}_s = -F \quad (\text{重錘にかかる力})$$

このモデルの運動方程式は

$$\ddot{x}_s - \ddot{x}_b = -\frac{F}{m_s} - \frac{F + F_e}{m_b} = -\frac{k}{\mu} (x_s - x_b - L) - \frac{F_e}{m_b} \quad (1)$$

または、

$$\mu \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_b} F_0 \sin \omega t$$

ここで、

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b}$$

または、

$$\mu = \frac{m_s m_b}{m_s + m_b}$$

$\mu$ は“相当質量”と呼ばれる。 $r$ はベースに対する重錘の相対変位である。

$$r = x_s - x_b - L$$

加速度計に加振力が加わらず ( $F_e=0$ ) 置かれた状態では下の自由振動の運動方程式になる。

$$\mu \ddot{r} = -kr$$

この式は  $m_s$  の変位が  $m_b$  に対して相対的に振幅  $R$  で正弦波状に変化するとおけば解ける。言いかえると、

$$r = R \sin \omega t$$

$$-\mu R \omega^2 \sin \omega t = -kR \sin \omega t$$

そして、加速度計の共振周波数  $\omega_n$  は次のように表される。

$$\omega_n^2 = \frac{k}{\mu}$$

この結果の意味は式を次のように書き換えると分かりやすい。

$$\omega_n^2 = k \left( \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} \right) \quad (2)$$

もし加速度計が加速度計より重い構造物に完全に剛に取り付けてあれば、 $m_b$  は  $m_s$  よりはるかに大きい。そして、加速度計の共振周波数は低くなる。その極限では、加速度計が限りなく重い構造物 ( $m_b \rightarrow \infty$ ) に取り付けられているときには上の式は次のようになる。

$$\omega_m^2 = \frac{k}{m_s} \quad (3)$$

これは重錘とバネ系の自然共振周波数であり、加速度計の取付け共振周波数  $\omega_m$  と定義されている。取付け共振周波数は質量とバネ系の加速度計の固有の性質である。後でこの周波数は加速度計の有効動作周波数レンジを定義するのに使われる。

加速度計の取付け共振周波数を測定するために無限に重く、剛な物体に取りつけて測定するなどということは現実には出来ない。実際には180gの鋼製のブロックに加速度計を取付け、これを一定加速度で広い周波数レンジで加振してやれば、近似的に取付け共振周波数が測定できる。これについては5章で検討する。



加速度計を取りつけた物体の剛性が十分でなかったり、加速度ベースと物体の結合が剛でない場合には共振周波数は変わるだろう。共振周波数は2つに分かれ、低い方の共振周波数は取付け共振周波数より低い。この点については第4章で検討する。

次に加速度計の強制振動について検討する。加速度計に加えられる強制力も含めて、先に導出した自然共振周波数 $\omega_n$ を解析すべきである。先のモデルに関する運動方程式は次のようになる。

$$f + \omega_n^2 r + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

そして、系の質量も正弦波状に変位すると仮定すれば

$$-\omega^2 R \sin \omega t + \omega_n^2 R \sin \omega t + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

そして、

$$R(\omega_n^2 - \omega^2) + \frac{F_0}{m_b} = 0$$

あるいは、

$$R = -\frac{F_0}{m_b(\omega_n^2 - \omega^2)}$$

加速度計の自然共振周波数より十分に低い周波数( $\omega \ll \omega_n$ )で変位(今は $R_0$ )は次のように表される。

$$R_0 = -\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}$$

低い周波数での変位 $R_0$ に対する高い周波数での変位 $R$ の比は次のように表される。

$$\frac{R}{R_0} = \frac{-\frac{F_0}{m_b(\omega_n^2 - \omega^2)}}{-\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}}$$

この比を $A$ とすれば上式は次のようになる。

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (4)$$

この重要な式から加振力の周波数が加速度計の自然共振周波数に近くなければ、加速度計ベースと重錘の相対変位は増加する。結局圧電素子に作用する力と加速度計の電気的な出力もまた増加する。B&K社の加速度計に使用されている圧電素子の力に対する感度は一定であるので、共振点近くでの加速度計出力の増加は加速度計の共振のせいである。加速度計の周波数応答曲線の代表的な形(図2.3)と振幅の測定誤差はこの考え方に基づく。これについては2.3節で述べる。

自由状態での加速度計の自然共振周波数は重錘の全質量の変換器の静止質量(主としてベースの質量)に対する比に大きく依存する。一般に加速度計の重錘の全質量は近似的にベースの質量と同じであるから下の関係が得られる。

$$\frac{\text{取付け共振周波数}}{\text{自由状態の共振周波数}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$$

## 2.3 周波数レンジ

加速度計の出力の相対変化を図2.3に示す。この種の周波数応答曲線は加速度計を一定の振動レベルで広い周波数範囲にわたって加振した場合の加速度計の出力変化である。こ

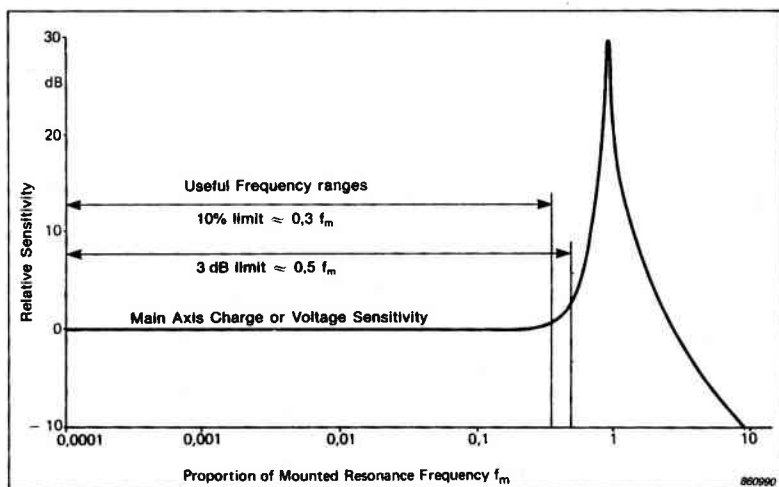


図2.3 加速度計の相対感度の周波数の関係。

のような周波数応答曲線を得るには加速度計を180gの加振器のヘッドに取りつけて測定する。こうして、加速度計の取付け共振周波数の近似値が得られる。この周波数応答曲線は前節の4)式に対応するが、取付け共振周波数に関しても4)式と同様の式が得られる。

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2} \quad (5)$$

(5)式によって振動の測定値と実際の値のずれが計算できる。また、使用可能な周波数範囲を決定することもできる。

### 2.3.1 上限周波数

一定の振動入力加速度計の一定の電気的出力に対応するような周波数範囲が取付け共振周波数によって決まることを図2.3 示す。取付け共振周波数が高い程、動作周波数範囲が広がる。しかし、取付け共振周波数を高くするには圧電素子を剛にするか、重錘を軽くしなければならない。ところが、圧電素子の剛性は一定であるから重錘を軽くしなければならない。その結果、圧電素子に作用する力が小さくなり、加速度計の感度は悪くなる。このような理由から非常に高い周波数で使用される加速度計の感度は相対的に低い。逆に高感度の加速度計の上限周波数はあまり高くない。加速度計の周波数応答曲線から次のような実用的な周波数範囲が定義されている。

**5%周波数限界**は加速度計の測定値と実際の振動レベルの差が測定値の5%以内に納まる周波数限界である。この場合、測定できる最大振動周波数は加速度計の取付け共振周波数の約5分の1(0.22)である。

**10%周波数限界**は測定値と実際の振動レベルの差が測定値の10%以内に納まる周波数限界である。この場合、測定できる最大振動周波数は取付け共振周波数の約3分の1(0.30)である。

**3dB周波数限界**は測定値と実際の振動レベルの差が測定値の3dB以内に納まる周波数限界である。この場合の最大振動周波数は取付け共振周波数の約2分の1(0.54)である。

### 2.3.2 下限周波数

圧電型の加速度計は振動の直流成分に対しては応答しない。そのため、実際の下限周波数は加速度計に接続したプリアンプによって決まる。すなわち、加速度計の電荷が漏れて無くなる割合による。B&K社の加速度計とプリアンプの場合、0.003Hzまで測定できる。1 Hzよりも低い周波数成分の測定が必要な応用例は非常にまれであるので、本当の直流分を測定できない事はほとんど問題にならない。

第3章の“振動プリアンプ”ではプリアンプの低周波数域性能について述べている。低周波数域の測定における環境の影響については第4章の“加速度計の性能”で扱っている。

## 2.4 圧電材料

圧電材料とは力を加えた場合に電荷を発生するものである。圧電性を示す材料としては、水晶やロッシェル塩のような圧電性単結晶の他に、バリウムチタン、鉛化ジルゴン、鉛化メタニオブ等から作られる強誘電セラミックを人工的に極性化させたものがある。セラミックの両端に高電圧を短時間作用させると極性化するが、これはちょうど軟鉄片を磁場で磁化する方法と似ている。外力が作用すると変形が起こり圧電材料の両端に反対の極性をもった電荷が溜まるように材料の分子構造が整列する。

図2.4にこの効果の簡単なモデルを示す。圧電型加速度計が振動すると、加速度に比例した力が作用しその結果、発生した電荷が電極によって取り出される。加えられた力と発生した電荷の関係は、非常に広いダイナミックレンジと周波数帯域で秀れた直線性を示す。そのため圧電型の加速度計も非常に優れた特性を持っている。圧電材料の感度は $\text{pC/N}$ (ピコクーロン/ニュートン)で与えられている。

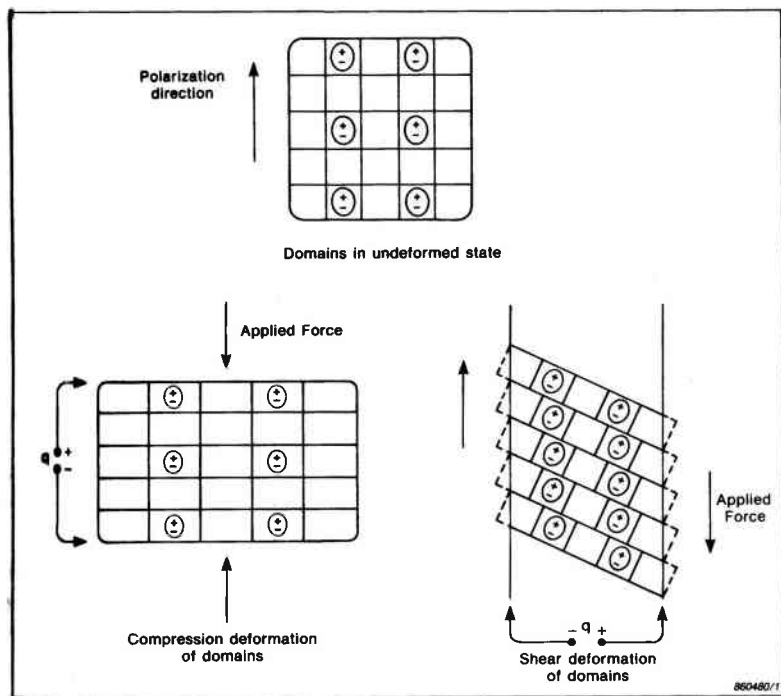


図2.4 人工的に極性化したセラミック内の圧電効果の簡単なモデル  
電荷 $q$ が表面に集まる。

図2.4に示すように圧電素子は圧縮に対しても、せん断に対しても動作する。いずれの場合も電荷は力の作用する面に発生する。

圧縮変形では電荷を分極方向に取り出す。この方法ではたとえば温度変動のような非振動入力に対しても、分極方向に電荷が発生するという大きな欠点がある。このような電荷も振動によって発生する電荷と一緒に検出されるので加速度計の出力は振動以外の影響を含んでいる。しかしながら、せん断変形を利用すると電荷は分極と直角方向に検出されるので温度変動に起因するような余計な電荷は検出されない。これが、せん断モードの加速度計の性能が圧縮モードのものより優れている理由である。

4.2.2節で温度変動の影響についてもっとくわしく述べる。

強誘電体のセラミックはどんな形状にも成形でき、成分の配合を変えれば目的に応じた特性を持たせることができる。水晶のような単結晶の圧電材料では成分が決まっているし、形についても結晶の寸法に制限される。このような理由から単結晶の圧電材料を用いた加速度計は強誘電体のものと較べると、一般に感度が低く、内部容量が小さい。

B&K社の加速度計に用いられている圧電材料はPZ23、PZ27、PZ45、PZ100、等で以下の性質をもっている。

1. PZ23は鉛化チタン、鉛化ジルコン系の強誘電体セラミックに属し、人工的に極性化されている。これは250°C (482°F)まで使用できる。高感度(約300pC/N)で同時にその他の性質も優れているため、B&K社のほとんどの加速度計に使用されている。
2. PZ27はPZ23に非常に近いもので、鉛化ジルコン、チタン系のセラミックを極性化したものである。これはミニチュア加速度計に適している。
3. PZ45は、温度特性が平坦になるように特別に開発された強誘電体セラミックで400°C (752°F)まで使用できる。これはB&K社の差動型高温高衝撃用加速度計に使用されている。
4. PZ100は特に厳選された水晶である。これは250°C (482°F)まで使用でき、温度変化に対する感度が特に低く、性質が安定している。これはB&K社の較正用標準加速度計8305型および力センサに使用されている。B&K社の加速度計に使用されている圧電体のタイプは加速度計に添付されたデータ表に記載されている。

## 2.5 加速度計の実際の構造

B&K社の加速度計は異なった3種類の構造のものがある。そのうちの2種類はブレナシェアタイプとデルタシェア<sup>®</sup>タイプで図2.5に示してある。図2.6の圧縮型も使われている。デルタシェア<sup>®</sup>タイプは特に性能が優れているのでB&K社のほとんどの加速度計に使われている。

- ①デルタシェア<sup>®</sup>構造 三角形のセンタポストの各面に3個の圧電素子とおもりが取りつけてある。これらの取りつけには接着剤やボルトは使わず、固定リングで周囲から締めつけて固定されている。このリングはあらかじめ応力を加えて、直線性を良くする作用をしている。電荷はハウジングと固定リングで集める。デルタシェア<sup>®</sup>構造は他の

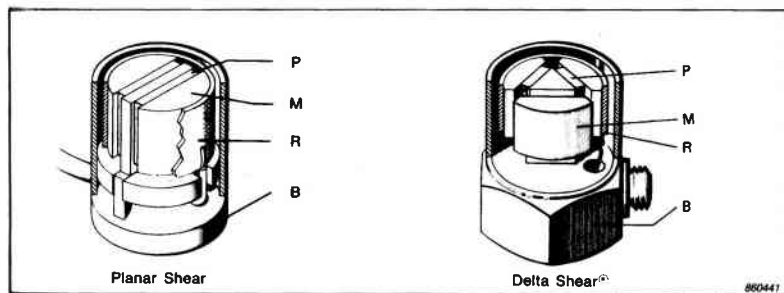


図2.5 平面シヤアタイプとデルタシヤア<sup>®</sup>タイプ構造。M=重錘、P=圧電素子、R=クランプリング、B=ベース。

タイプと較べて高感度であり、共振周波数が高く、基部のひずみや温度の影響を受けにくい。このタイプは特性が全ての点で優れているので汎用加速度計にも特殊用途にも適している。

②プレナシヤアタイプ この構造でも圧電素子はデルタシヤア<sup>®</sup>と同じようにせん断変形を受ける。2つの四角い圧電素子が四角いセンタポストの両面に取りつけられている。図2.5のように2個のおもりがデルタシヤア<sup>®</sup>タイプと同じように、固定リングで強く締めつけられている。圧電素子の取り付けられているセンタポストは加速度計のベースの曲げによるひずみや温度変化の影響を受けないように作られている。

③素子圧縮タイプ 従来から用いられているこのタイプの構造の加速度計は中程度の感度をもっている。圧電素子の質量バネ系は加速度計のベースに取りつけられた円柱形のセンタポストの上に固定されている。加速度計のベースとセンタポストは圧電素子に対するバネとして動作するので、一方ではベースに曲げや温度ひずみ加わった場合圧電素子も変形して、信号に誤差が混入する。B&K社はこの誤差を小さくするために非常に厚いベースを使用しているが、それでもなお曲げや引っ張り力による影響が混入し、誤差の原因になる。前節で述べたように、圧縮タイプの構造では温度変化によっても圧電素子に電荷が生じる。

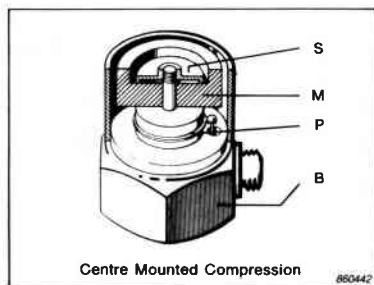


図2.6 圧縮タイプの構造。M=重錘、P=圧電素子、B=ベース、S=ばね。

以上のような理由からB&K社では高強度の測定用(たとえば衝撃測定用)のように信号レベルが高く相対的にその他の誤差出力の影響の小さいような使用目的用に限って、圧縮タイプを製造している。圧縮タイプのもう一つの用途は、一定の環境下で使用される。標準校正用加速度計である。この場合、ベースの強度を上げるためにベリリウムディスクを加えて、曲げの影響を最小にしている。この加速度計は測定精度を上げるために逆に取りつけて使用される。

### 2.5.1 ラインドライブ型加速度計

このタイプの加速度計にはプリアンプが内蔵されている。図2.7ラインドライブ型加速度計である。このタイプの加速度計の機械的構造はデルタシェア<sup>®</sup>と同じである。電気的部分は高性能の厚膜半導体ICが使用されている。第3章でプリアンプ部分の機能について述べている。

ラインドライブ型加速度計では回路を駆動する電気を外部から供給する必要がある。組み込み回路には定電圧で電力を供給し、振動信号は変調されて外部電源の方に送られる。これについても第3章で述べる。

しかしながら組み込んだ電子回路のために温度と衝撃が制限される。この問題を克服するためにB&K社は加速度計と組み合わせて使用する分離型のラインドライブプリアンプも製造している。





図2.7 B&K社のラインドライブ型加速度計。組み込まれた電子回路が見えるようハウジングが取り除いてある。

### 2.5.2 その他の型の構造

圧縮形やせん断形の原理に基づいた他のタイプの構造の加速度計もある。しかしながらB&K社は上記のタイプのものしか扱っていない。なぜならデルタシェア<sup>®</sup>は現在得られる最良の性能を持っているからである。他ではまだ次のような構造のものもある。

**円筒シェア構造** これは圧電素子と質量が円筒型で両者は接着されている。

**軸立シェア(ボルト止めシェア)構造**はプレナシェアと似ているが圧電素子はボルトで固定されている。

## 2.6 加速度計の感度

これまで加速度計は加速度に比例した電荷を発生するデバイスであることを述べた。測定器としての加速度計の役割を予測するために入力(加速度)と出力(電荷または電圧)の関係をもっと詳しく検討してみる。

## 2.6.1 電荷と電圧感度

圧電型加速度計は電荷あるいは電圧源と見なせる。圧電素子は電気的には容量 $C_a$ (キャパシタンス)に並列に実用的には無視できる程の高抵抗の漏洩抵抗 $R_a$ を接続したものととして働く。そして回路上路では図2.8に示すように電荷源 $Q_a$ と並列に $C_a$ とケーブル容量 $C_c$ (キャパシタンス)を接続したものか、あるいは電圧源 $V_a$ に直列 $C_c$ と $C_c$ を接続したものと等価である。どちらのモデルも場合に依じて計算が簡単になる方が用いられる。

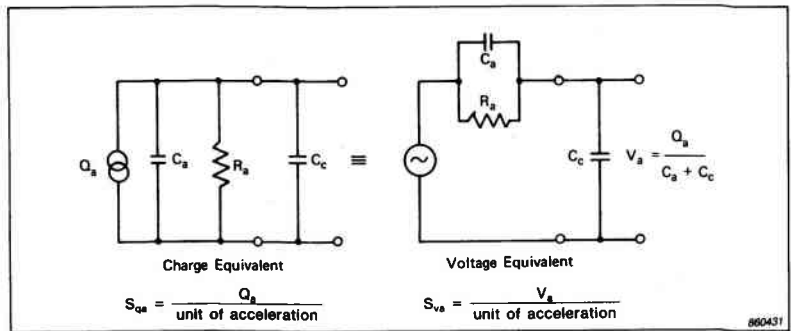


図2.8 圧電素子と接続ケーブルの等価回路。

加速度計からの出力を電荷で検出するか、電圧で検出するかによって加速度計のプリアンプを選ぶ。圧電型加速度計の電荷感度 $S_{qa}$ は単位加速度当たりの発生電荷(測定単位はpC)で評価される。

$$S_{qa} = \frac{\text{pC}}{\text{ms}^{-2}} = \frac{\text{pC}_{\text{RMS}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{RMS}}} = \frac{\text{pC}_{\text{peak}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{peak}}}$$

同様にして電圧感度 $S_{va}$ は単位加速度計当たりの出力電圧で評価する。

$$S_{va} = \frac{\text{mV}}{\text{ms}^{-2}} = \frac{\text{mV}_{\text{RMS}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{RMS}}} = \frac{\text{mV}_{\text{peak}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{peak}}}$$

図の簡単な回路から加速度計の出力は加速度計容量(キャパシタンス)とケーブルの容量(キャパシタンス)に分かれていることが分かる。このためケーブル容量がケーブルの変換率(ケーブルの長さの変化によって変わった場合、電圧感度も変化することが分かる。その場合感度を再校正する必要がある。これが電圧型のプリアンプを使用する場合の主な欠点であり、このことについては第3章で詳しく述べる。現在ではほとんどすべての場合、チャージアンプが使用されている。

低周波数から中間周波数の振動では、加速度計の有効周波数範囲内で電圧感度は周波数に無関係である。この事は、圧電材料PZ45やPZ100を用いた加速度計の電荷感度については正しいが、PZ23やPZ27を用いたものについては異なる。この場合は電荷感度と容量の双方が1ディケード(1桁)増加する毎に2.5%減少するように設計してある。この減少特性の効果で共振時の出力上昇が少し低減される。そのため、測定値と実際の振動の差は、PZ23を用いた中域から高域に共振点をもつ加速度計では図2.9に示したように±5%程度に抑えられている。

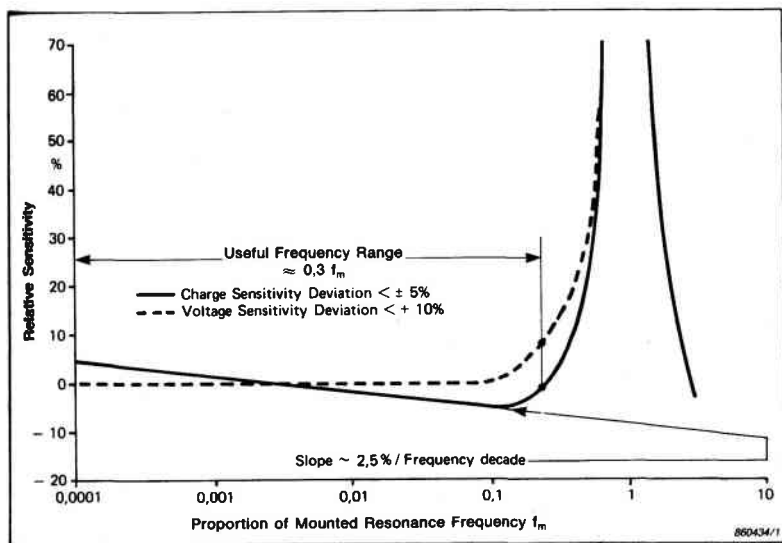


図2.9 圧電素子のPZ23を用いた加速度計の電荷と電圧感度の周波数特性。

## 2.6.2 ユニゲイン<sup>®</sup>の感度

B&K社のほとんど全ての加速度計はユニゲイン<sup>®</sup>として設計されている。ユニゲイン<sup>®</sup>とはこれらの加速度計の感度が2%の精度で1:3.16:10:31.6pC/ms<sup>-2</sup>の便利な値に設定されていることを意味している。ユニゲイン<sup>®</sup>加速度計は何かの都合で加速度計を同型の他のものと取り換えても計器の設定を変える必要がない。上記の感度の数列は互いに10dB間隔なので測定システムの較正が非常に簡単である。たとえば、ある加速度計を他のものと取り換えた場合、測定器のゲインを10dB単位で切り換えれば良い。

ユニゲイン<sup>®</sup>感度はB&K社が加速度計内の重錘を精密に調整して達成された。

## 2.6.3 リニアリティとダイナミックレンジ

直線はあらゆる測定システムに要求される基本的要素である。システムからの出力はできるだけ広い周波数とダイナミックレンジにわたり入力に直線的に比例することが望まれる。優れた直線性をもったB&K社の加速度計の特性を図2.10に示す。

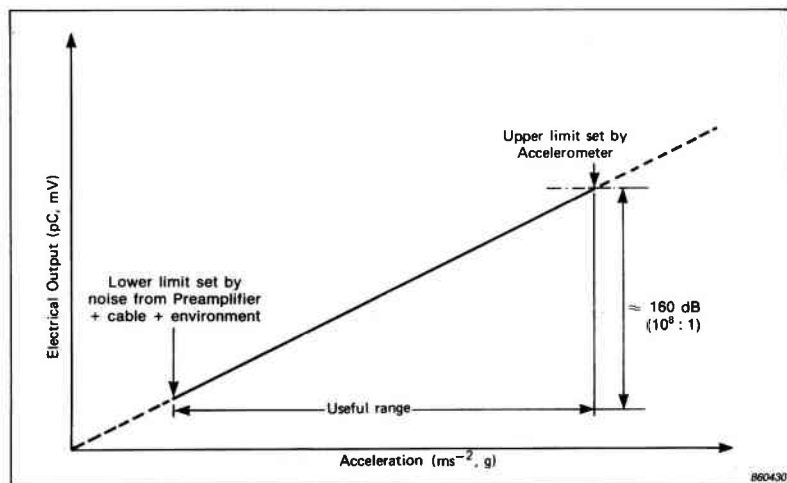


図2.10 優れた直線性と広いダイナミックレンジを示す圧電型加速度計の出力。

圧電素子が非常に広いダイナミックレンジを持っているので圧電型の加速度計は広いダイナミックレンジで良い直線性をもっている。理論的にはこの加速度計は加速度計ゼロのところまで直線的であるが、実用上の下限は測定系に存在するノイズによって決まる。ノイズ源には数種のものがあるが、これについては第3章と第4章で述べる。

加速度計に上限以上の加速度が加わると性能は直線性は悪くなる。上限値を大きく越えようと、予圧をかけたリングがすべり始め、最終的にはベースとショートを起こし、加速度計は壊れてしまう。しかしながら、加速度計の使用範囲をよほど越えない限りこのような事は起こらない。

#### 2.6.4 横方向感度

加速度計の軸に直角方向から加速度が作用する場合にも多少の出力が表れる。加速度計の較正チャートには横方向感度が主感度に対するパーセンテージで示されている。理想的には横感度はゼロであるべきであるが、実際には圧電素子や金属部品のわずかな不均一のせいで、そうはならない。B&K社では均一な圧電セラミックの選定と加工、研磨、仕上げに特別に注意を払っている。こうした取扱と取付け表面を清浄で平滑に保つことで、B&K社の加速度計の横方向感度は(30Hz)最大でも主感度の4%を超える事は無い。

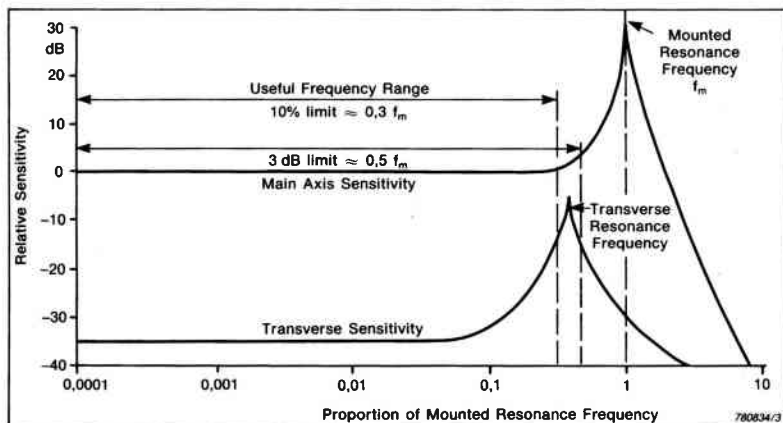


図2.11 主軸方向と横方向の相対応答感度。

主軸方向の共振周波数の1/6の周波数において横感度は10%以下である。また主軸方向の共振周波数の1/3強の所では横方向共振周波数があるので横方向感度を明示するのは難しい。これを図2.11に示す。

図2.12に示すように、横方向感度の原因は加速度計の最大感度の方向が加速度計の取付け軸と一致していない為と考えられる。したがって、横方向感度が最大および最小となる方向は互いに直交し、かつ主感度軸に直角である。加速度計の校正チャートに示されているのは横方向感度の最大値である。最小横感度の方向は加速度計の上に赤点で示されている。

この方法はB&K社だけのものである。

デルタシェア<sup>®</sup>はどの横方向に対しても同じ剛性をもっているので横方向共振周波数は1つしかない。他のシェア構造のものは一般に2つまたはそれ以上の横方向共振周波数をもっている。

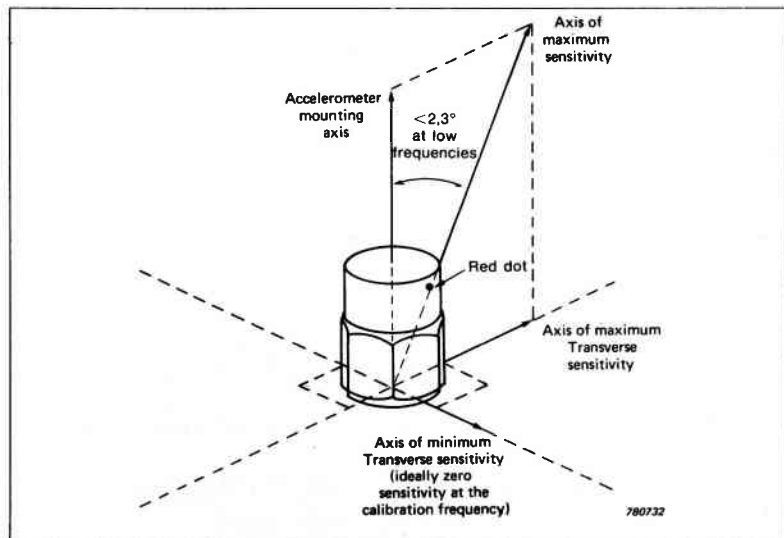


図2.12 横方向感度の図示。

横方向の共振周波数は実用的な使用周波数範囲のすぐ外にあり、感度のピーク値は主軸感度よりわずかに低い。そのため、横方向振動や衝撃は測定目的とする主軸方向のものより十分低くなければならない。同様に加速度計を落としたり、たたくと設計限界の大きな横方向衝撃が加わり、加速度計内部の圧電素子に永久的な損傷を与える原因になる。

横方向振動が強い場合、下記の点について注意しなければならない。

1. 加速度計の赤点が横振動が最大の方向になるように取りつける。

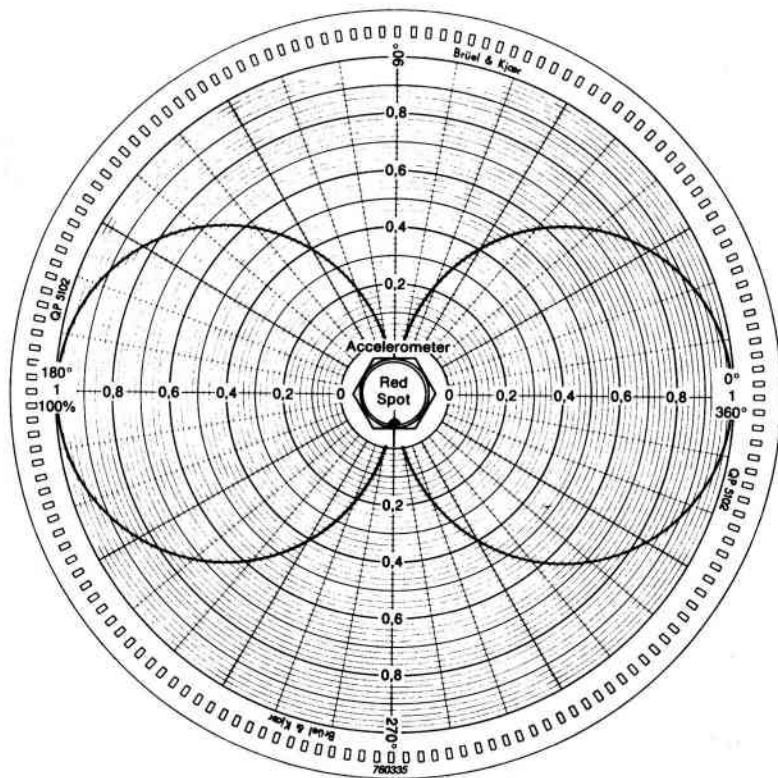


図2.13 加速度計の最大横感度が分かっている場合の任意の方向の横感度を決定するためのチャート。

2. 主軸方向以外の方向の振動をメカニカルフィルタを用いて除く。
3. 最大横方向感度から図2.13のチャートを用いて任意の方向の横方向感度を計算して補正する。

**例** 最大横方向感度の方向から約60°の方向の横感度は最大感度の約0.5である。(この値は角度のcos. から計算できる。)これから、たとえば最大横方向感度が2%の加速度計は60°方向で $0.5 \times 2\% = 1\%$ の横方向感度をもつ。

$$0,5 \times 2\% = 1\%$$

## 2.7 位相応答

加速度計の位相のずれは、振動の入力に対する電気出力の時間遅れに対応している。もし、使用周波数範囲で位相が一定でなければ、種々の周波数成分を持った振動出力の周波数成分間の位相の相対関係は変化してしまう。その結果、振動入力から歪んだ電気出力が現れる。

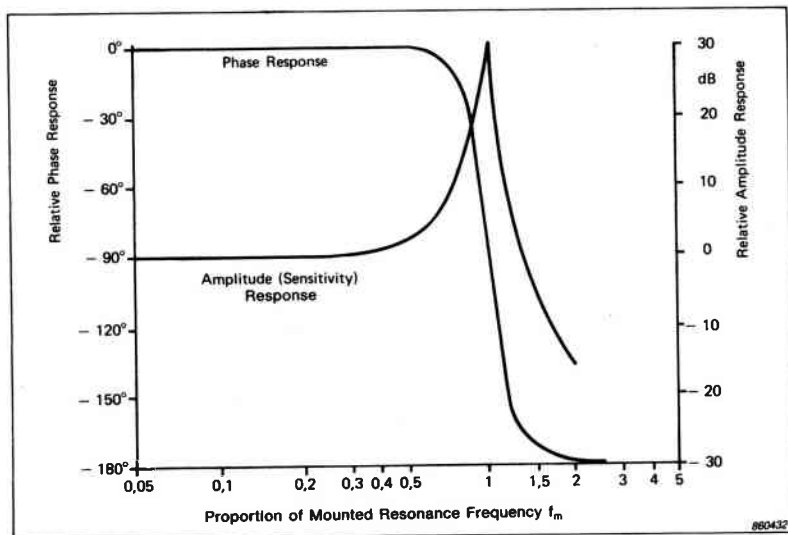


図2.14 周波数の関数として加速度計の出力振幅と位相応答。



加速度計の感度と位相応答を図2.14に示す。加速度計の共振周波数以下では位相のずれはあまり大きくない。共振周波数近くでは、重錘の運動はベースの運動から遅れ、位相ひずみが起こる。しかしながらB&K社の加速度計では共振抑制が付くわえられているので共振の影響する範囲は相対的に狭くなっている。そのため、規定周波数範囲を少々越えて加速度計を使用しても位相ひずみは少ない。

一方チャージアンプまたは電圧アンプの位相特性も考慮しなければならない。とくにアンプやフィルタが組み込まれている場合は注意を要する。このことは過渡的な振動や衝撃を測定するときには特に大切である。

## 2.8 過渡応答

過渡的な振動や衝撃を測定するときには、測定システム全体の直線性に注意しなければ、測定波形はひずむ。圧電加速度計は極めて直線性が優れているので広い範囲の過渡現象が、問題なく測定できる。過渡現象の測定でこの加速度計が測定誤差の原因になることはほとんどない。問題の原因となるのはプリアンプやフィルタやIC回路の場合が多いが測定測定精度を確保するためには次に述べる過渡現象について考慮する必要がある。

### 2.8.1 漏洩効果

ロケットの発進や高速エレベータに起こる定常加速パルス波形のひずみの例を図2.15に示す。このようなひずみは加速度計とプリアンプの組み合わせを不適切な周波数レンジで使用した場合に起こるが原因は次のように説明できる。

加速度計が定常加速にさらされるととき圧電素子内に電荷が発生する。素子の容量(キャパシタンス)のおかげで電荷は素子内に貯えられ、加速度計の非常に高い漏洩抵抗から漏れ出してしまわない。しかしながら、加速度計の有限の漏洩時定数と入力インピーダンスとプリアンプの下限周波数のために電荷が漏れ出して図のAからBの負の勾配部分が現れる。加速がとまるとき、それに相当する分だけ電荷は減少するので、図Cのようにゼロ以下にまで落ち、その後ゼロ(D点)までもどる。AB間およびCD間の曲線の対数変化率は同じで、この値は加速度計とプリアンプによる時定数によって決まる。

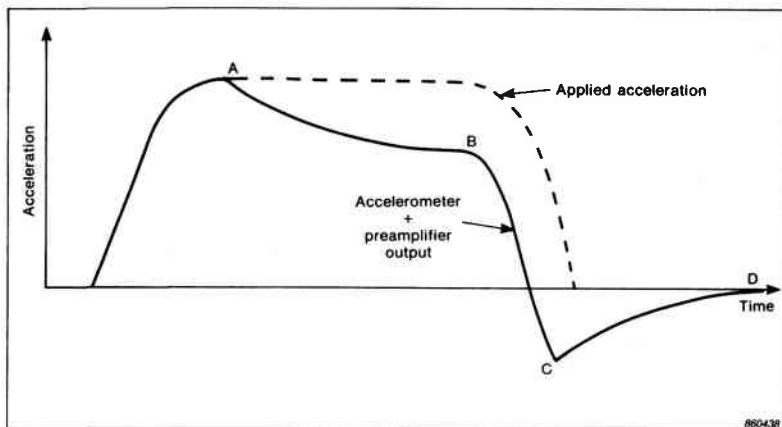


図2.15 加速度計とプリアンプの“漏洩”によって生じる準定常加速度波形のひずみ。

この効果は加速度のピーク値測定の誤差の原因になり、下限周波数を不適切に設定したプリアンプに加速度計を接続した事に起因する。漏洩によるピーク値誤差を5%以内に保つためには、プリアンプの下限周波数(-3 dB値)を $0.008/T$ にする。ここでTは方形波による過渡周期である。半正弦波状の過渡信号測定の場合は下限周波数は $0.05/T$ にすべきである。

過渡現象を特定の精度で測定する場合、測定系の周波数帯域は図2.16から読み取れる。過渡信号をひずみなしに再現するために必要な高周波数成分を扱うための上限周波数も示してある。

不適切な周波数範囲の設定によって起こる過渡現象や準定常振動波形のひずみと同様のひずみはゼロ点移動(2.8.3節)によっても起こる。しかしながら、これらは異なった原因によって起こるので解決方法も異なる。

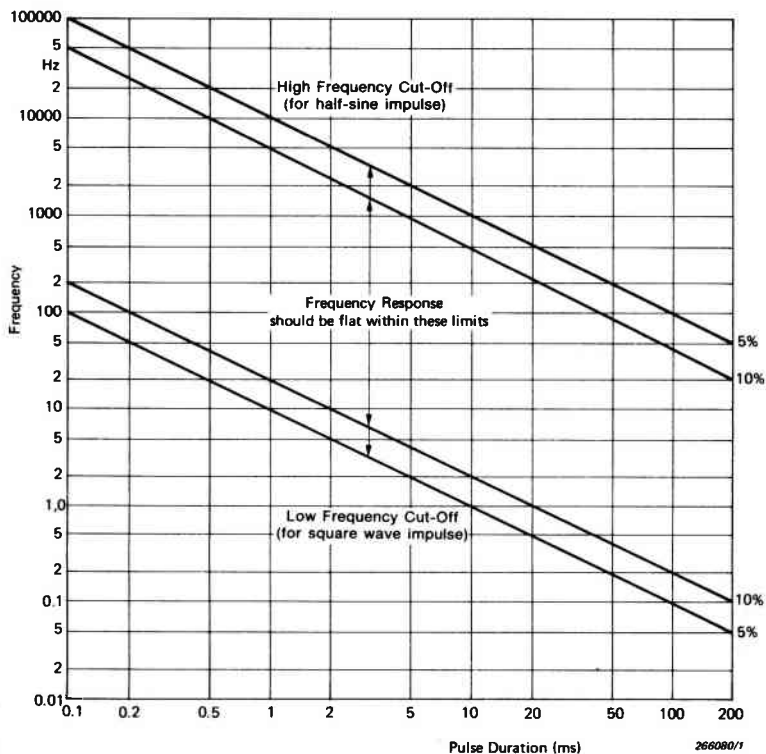


図2.16 T時間続く方形パルスの加速度を測定する場合に測定誤差を5%および10%にするために必要な振動測定系の下限および上限周波数の設定値。

### 2.8.2 リンギング

この言葉は、加速度計が過渡振動の測定時にその有効な周波数範囲外で使用されるときに発生するひずみを意味している。この現象による波形ひずみの例を図2.17に示す。加速度計の共振周波数が振動の高周波数成分によって励起される。リンギング発生最初の目やすはプリアンプのオーバーロード表示である。

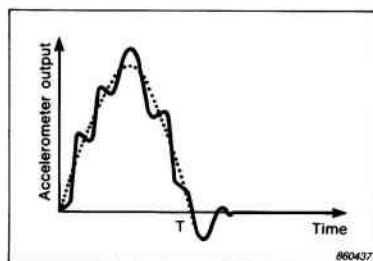


図2.17 リンギングによる波形のひずみ。

リングングは振動振幅のピーク測定に誤差を生じる。測定誤差を5%以内に抑えるには加速度計の取付け共振周波数は $10/T$ 以上でなくてはならない。ここで $T$ は過渡現象の長さ(秒)。加速度計の共振はリングングを抑え、測定系のダイナミックレンジと周波数帯域を適切に設定すれば減衰させることができる。そのためには加速度計の取付けにメカニカルフィルタ(4.5節)を用いるとか、ローパスフィルタ付のプリアンプを利用すればよい。後者の場合、そのフィルタは12dB/オクターブの急な減衰特性および加速度計の取付け共振周波数 $f_m$ の約半分のところに-3dBの上限周波数 $f_u$ を設定する。(すなわち $f_u=0.5f_m$ )こうすれば、図2.18に示すように半正弦波状の接続時間 $T=1/f_m$ の過渡振動を振幅誤差10%以内で測定できる。

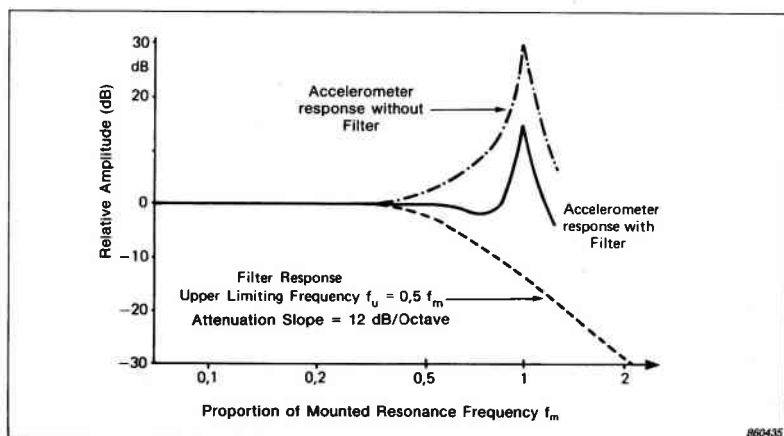


図2.18 半正弦波状の衝撃(持続時間 $T=1/f_m$ )の振幅を誤差10%以内で測定するために加速度計の取り付け共振周波数 $f_m$ を減衰させるのに必要なローパスフィルタまたはプリアンプの応答。

### 2.8.3 ゼロ点移動

2つの同じ波形の正弦波状パルスによって加速度計の出力が図2.19のようになった場合を考えてみよう。どちらの場合も波形のひずみの原因は加速度計である。この測定のダイナミックレンジはほとんど加速度計の加速度の上限値に近い。

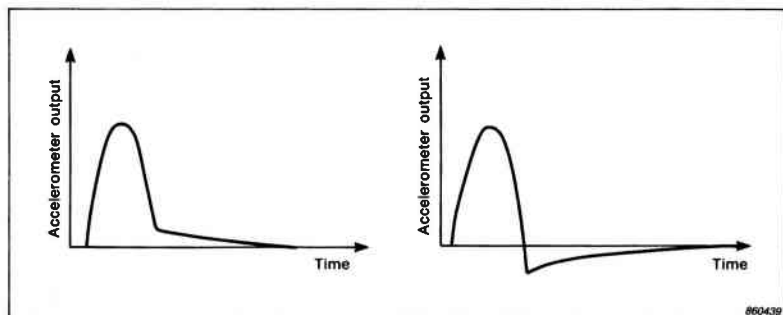


図2.19 高レベルの半正弦波状パルスのために“ゼロ点移動”が生じた加速度計とプリアンプの出力。

圧電素子が完全な弾性体でないならば素子に加わっていた力が突然減少した場合、分子レベルでは完全には元にもどらないことがある。その場合、力が取り除かれても素子はまた電荷を発生しており、この電荷はゆっくりと減衰する。この減衰の時定数はプリアンプの下限周波数によってきまる。この現象はランダムに起こり、ゼロ点移動の正負もランダムである。

発生したゼロ点移動が消えるには元のパルスの長さの1000倍もの時間がかかるので積分回路を使用した場合には大きな誤差が発生する。

メカニカルフィルタはこのゼロ点移動効果をふせぐのに有効である。

注：ゼロ点移動や漏洩やリングングは加速度計が有効な動作域を越えた所で使われる場合に限って現れる問題である。

### 3. 振動測定用プリアンプ

振動測定用の基本的役割は圧電型加速度計の高インピーダンス出力を後にある測定解析用測定機器に適した低インピーダンスの信号に変換することである。これに加えて、プリアンプは下記の役割のいくつかまたは全部をはたす。

1. 加速度計の出力と測定機器の入力感度を合わせる。
2. 測定系の感度が目的の値になるように振動信号を増幅する。
3. 加速度計の出力を積分して、速度と変位の信号を得る。
4. プリアンプの入力と出力の過負荷状態を警告する。
5. 望ましくない信号をハイパスやローパスフィルタで除去する。

図3.1はB&K社の汎用振動プリアンプである。B&K社のプリアンプは次のような形で提供されている。

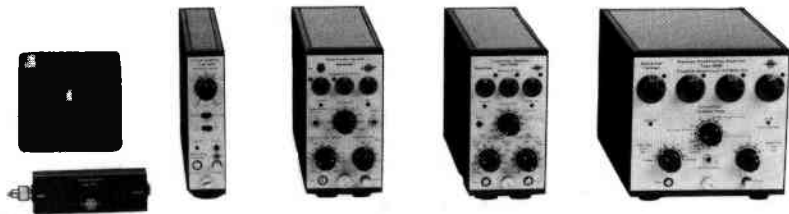


図3.1 B&K社の振動測定用プリアンプ。

1. 上記の全ての役割に使用できる独立タイプ。これらの電源は電池と交流のどちらでも使用できる。このタイプの仕様は付録Eにまとめられている。
2. 測定器(たとえば振動計)の入力部分、あるいはテープレコーダの入力モジュールに使用されている。このタイプの仕様については付録Fにある。
3. ラインドライブ・プリアンプ。これは上の1、2とも相当異なる。加速度計に組み込む、加速度計の上に乗せる、近くに置くなどの形で従来のプリアンプの前段に使用されるミニチュア化されたもの。同軸または2線のケーブルは信号伝送と電源に共用される。ラインドライブ・プリアンプは固定ゲインである。

### 3.1 プリアンプの種類と働き

圧電型加速度計用のプリアンプには2種類のタイプがある。

1. チャージ型プリアンプ。これは入力側の電荷に比例した電圧を出力する。電荷を増幅するものではない。
2. 電圧型プリアンプ。入力電圧に比例した電圧を出力する。

一般に圧電型加速度計では電圧型プリアンプよりもチャージ型プリアンプの仕様が望ましい。B&K社のプリアンプ製品にもこのことが反映されていて、2650型がチャージ型と電圧型の両方の入力端子を備えているのを除けば、すべてチャージ型プリアンプである。2650型が2種類の入力端子をもっている理由は、このアンプは加速度計用というよりも汎用振動測定用アンプであるからである。チャージアンプは加速度計のケーブルが長くても短くてもシステムの感度が変わらないという優れた性質を持っている。一方、電圧型アンプを使用すれば、2.6.1節で述べたように、ケーブルの長さが変わればシステム感度を再校正する必要がある。

### 3.2 チャージ型プリアンプ

チャージアンプの入力段にはオペアンプが使われている。オペアンプのフィードバック部分に容量を入れた回路は積分回路として働き、入力電流を積分する。この入力電流は加速度計中の圧電素子が発生した電荷によって流れている。このアンプはこの電流が流れないように、圧電素子の電荷に比例した電圧を発生するように働く。

### 3.2.1 チャージ感度

チャージアンプの電圧出力は入力部の電荷に比例し、したがって加速度計に作用する加速度に比例する。ゲインは入力側オペアンプのフィードバック容量によって調節される。

図3.2はチャージアンプに接続された圧電型加速度計系の等価回路である。

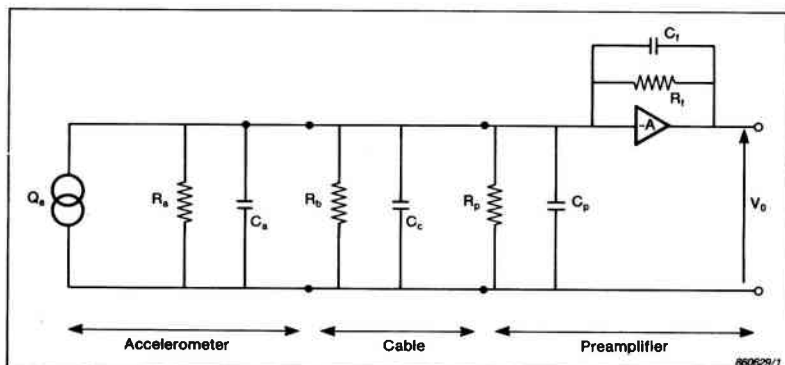


図3.2 加速度計、ケーブル、チャージアンプ系の等価回路。

- $Q_a$  = 圧電素子に発生した電荷 (加わった加速度に比例する。)
- $C_a$  = 加速度計のキャパシタンス
- $R_a$  = 加速度計の抵抗
- $C_c$  = ケーブルとコネクタのキャパシタンス
- $R_b$  = ケーブルの芯線とシールドメッシュの間の抵抗
- $C_p$  = プリアンプ入力側のキャパシタンス
- $R_p$  = プリアンプ入力側の抵抗
- $C_f$  = フィードバックキャパシタンス
- $R_f$  = フィードバック抵抗
- $A$  = オペアンプの利得
- $V_o$  = プリアンプの電圧出力



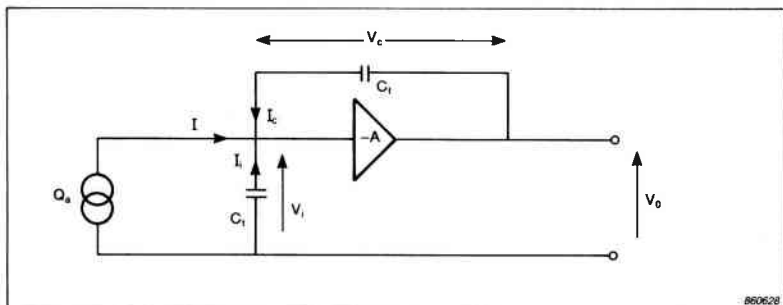


図3.3 チャージアンプに加速度計を接続した場合の簡単な等価回路。

加速度計、プリアンプ入力側、フィードバック回路の抵抗値はふつう非常に高い。このことを考慮すれば、図3.2の等価回路は図3.3のように簡単になる。図中のキャパシタンスと電流は下記のとおり。

$$\begin{aligned}
 C_f &= C_a + C_c + C_p \\
 I &= \text{加速度計から出る全電流} \\
 I_i &= C_i \text{ からの電流} \\
 I_c &= \text{オペアンプのフィードバックループを流れる電流} \\
 V_c &= \text{フィードバックコンデンサにかかる電圧}
 \end{aligned}$$

入力電圧  $V_i$  と出力電圧  $V_o$  の関係を次のようにあらわす。

$$V_o = -A V_i$$

さらに  $V_c$  は次の式で計算できる。

$$V_c = V_o - V_i = V_o - \frac{V_o}{-A} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o$$

理想増幅器には入力電流は流れないから、キルヒホックの法則よりつぎのように表される。

$$I + I_i + I_c = 0$$

これらの電流はそれぞれ回路のパラメータで表現できる。I は圧電素子に発生する電荷とつぎの関係がある。

$$I = \frac{dQ_a}{dt}$$

$$I_c = C_f \frac{dV_c}{dt} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dV_o}{dt}$$

$$I_i = -C_i \frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{A} C_i \frac{dV_o}{dt}$$

これらの式をキルヒホッフの式に代入すれば、加速度計からの電流が得られる。

$$\frac{dQ_a}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_i \frac{dV_o}{dt} - \frac{1}{A} C_i \frac{dV_o}{dt}$$

この式を積分して解くことができる。増幅器の出力側にある初期直流オフセットを表す積分定数はゼロとする。なぜならそのオフセットはプリアンプが動作を始めるとすぐに消えるからである。こうして上式の解が得られる。

$$V_o = -\frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_i + \frac{1}{A} C_i} \quad (1)$$

Aは10<sup>5</sup>のオーダーであるから、上式は次のように簡略化できる。

$$V_o = -\frac{Q_a}{C_i} \quad (2)$$

この式から出力電圧が入力電荷に比例し、したがって加速度計の加速度に比例することが解かる。プリアンプ利得はフィードバックキャパシタンスによって決まる。

理想的な場合(A→∞)、入力電圧はゼロであるから入力側のキャパシタンスは出力電圧に無関係となる。

$$V_i = -\frac{V_o}{A} = 0$$

結局、有限の大きさの入力抵抗は出力電圧に関係しない。これは入力部分には加速度計からの電流とフィードバックコンデンサからの電流だけがながれることを意味し、これらの電流は大きさが等しく方向が反対である。言い換えれば加速度計から流れる電流は全てフィードバックコンデンサへ流れている。

簡単なモデルについてはこの程度にしておき、次にR<sub>a</sub>, R<sub>b</sub>, R<sub>p</sub>の影響を考慮したもうすこし現実に近いモデルについて考えてみる。そのようなモデルとして入力部に抵抗R<sub>i</sub>とキャパシタンスC<sub>i</sub>を組み合わせた図3.4のようなものを考える。この場合の式は次のようになる。

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_p}$$

$$V_o = -AV_i$$

$$V_c = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o$$

$$I_c = C_f \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{R_f}$$

$$= \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[ C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right]$$

$$I_i = -C_i \frac{dV_i}{dt} - \frac{V_i}{R_i} = \frac{1}{A} \left[ C_i \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_i} \right]$$

$$\frac{dQ_a}{dt} = - \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[ C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right] - \frac{1}{A} \left[ C_i \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_i} \right]$$

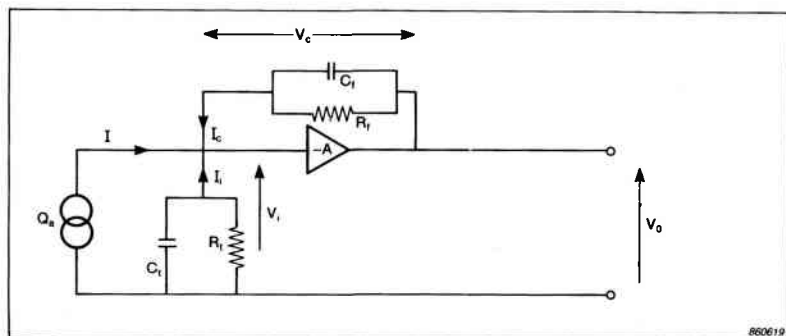


図3.4 チャージアンプに加速度計を接続した場合の等価回路。

上の式は前のように簡単に積分することはできない。

しかし、電圧と電流が正弦波的に変化すると仮定すれば解は得られる。前と同様に直流項と急速に消える初期状態を無視することができ、解は下記ようになる。

$$j\omega Q_a = - \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[ j\omega V_o C_f + \frac{V_o}{R_f} \right] - \frac{1}{A} \left[ j\omega V_o C_i + \frac{V_o}{R_i} \right]$$

この式を変形して、出力電圧 $V_o$ を表すと、

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right) + \frac{1}{A} \left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right)} \quad (3)$$

前と同様に $A$ と $R_f$ が非常に大きいとすると、前と同じ式が得られる。

$$V_o = - \frac{Q_a}{C_f} \quad (4)$$

もし $R_f$ が有限の場合には次の式が得られる。

$$V_o = - \frac{Q_a}{C_f \left(1 + \frac{1}{j\omega R_f C_f}\right)} \quad (5)$$

$Q_a$ は加速度計の加速度に比例するから、加速度計とプリアンプを組み合わせた系の感度は $C_f$ を変えることによって調節できる。さらに、フィードバックループの時定数を変化させることによって、チャージアンプの低周波数応答を制御できることが(5)式から分かる。

### 3.2.2 下限周波数

チャージアンプの低周波数応答は入力オペアンプのフィードバック回路の時定数の設定により決まり、入力負荷には無関係である。下限周波数はフィードバック抵抗を変えて変化させる。

加速度計は自己起電タイプのデバイスであるので直流応答に相当するものはない。物理学的に言って、仕事の源のないものからエネルギーを引き出すことができないことは明白であるから、圧電素子に静的な力が加わった状態は加速度計にエネルギーを供給していない。

チャージアンプや電圧アンプの低周波数域での性能を十分に理解するためには、まず簡単なRC回路の性能を理解する必要がある。

コンデンサは電荷を貯蔵するデバイスである。その容量は単位電圧当りに貯えられる

電荷量で定義されている。電圧 $V$ と電流 $I$ と電荷 $Q$ と理想コンデンサ(この場合は圧電素子相当)容量 $C$ の間の関係は次の式で表される。

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$I = C \frac{dV}{dt}$$

理想コンデンサに電荷が貯えられ、両端の電圧が $V_0$ になった場合、その電圧は保たれる。これは理想コンデンサが、直流に対して完全に絶縁されている(洩れ抵抗が無限大)からである。しかしながら、現実のコンデンサでは絶縁抵抗は有限であるので貯えられた電荷は洩れる。そのため、電圧は系の時定数で定められた割合で対数的に低下する。

このことは図3.5に示している。

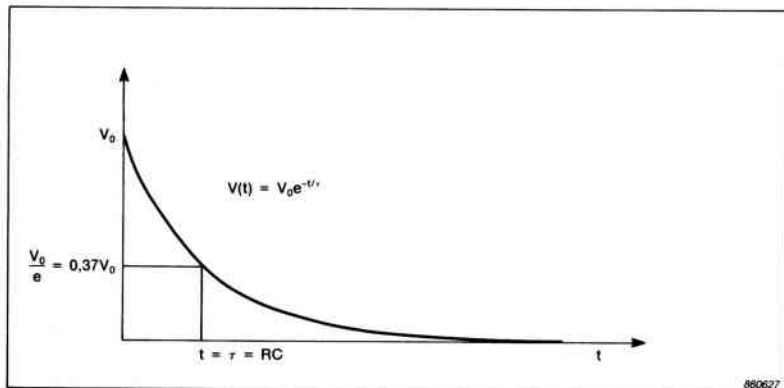


図3.5 時定数 $\tau$ の概念を表すコンデンサ前後の電圧の対数減衰。

正弦波状の信号を測定する場合には、時定数では非常に重要である。これは系の低周波数特性に影響を及ぼす。電荷源(圧電素子)をRC回路に接続した場合を図3.6に示す。図ではいくつかの抵抗と容量をまとめて各々1個の回路要素としている。

上述の物理量を使って式を書くと、下のようになる。

$$= \frac{dQ}{dt} = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$$

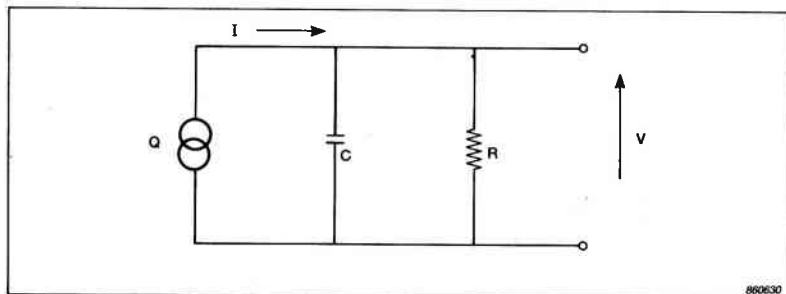


図3.6 ケーブルとプリアンプの等価キャパシタンスと等価抵抗に接続された加速度計の等価回路。このモデルはプリアンプの低周波数特性の検討に使う。

ここでも電流と電圧が正弦波であると仮定すれば次の解が得られる。

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega RC}\right)C} = \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau}\right)C} \\
 &= \frac{Q\left(1 + j\frac{1}{\omega\tau}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}\right)C}
 \end{aligned}$$

簡単のため直流分と初期値はゼロにしている。上の複雑な式から出力振幅の絶対値  $|V|$  と入力に対する位相角  $\phi$  は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \tan\phi &= \frac{1}{\omega\tau} \\
 |V| &= \frac{Q\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2}}{\left(1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2\right)C}
 \end{aligned}$$

ここで  $\omega\tau = 1$ ,  $\tan\phi = 1$ ,  $\phi = 45^\circ$   $V = \frac{Q}{\sqrt{2}C}$  となる。

入力と出力電圧の位相と振幅の  $\omega\tau$  にかんする変化を図3.7に示す。 $\omega\tau = 1$  ( $2\pi fRC = 1$ ) の場合の周波数は次のようになる。

$$f_i = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

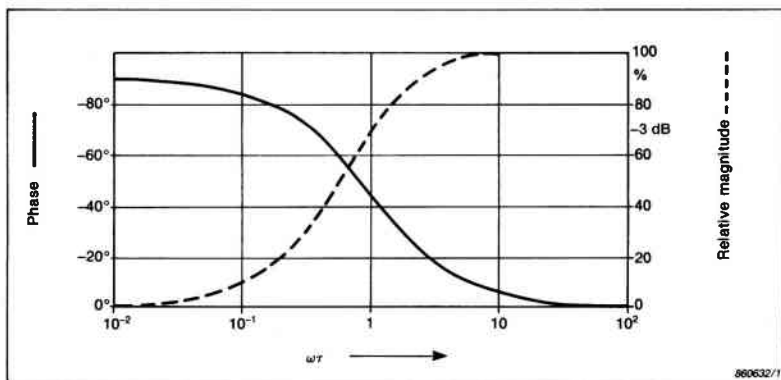


図3.7 入力電圧と出力電圧の位相と振幅の $\omega\tau$ に関する変化。

これは一般に下限周波数(LLF)と呼ばれ、出力信号のレベルが3 dB下った所で定義され、位相は45°遅れる。

再びチャージアンプに戻って、3.2.1 節の(3)式から下限周波数(LLF)はフィードバックループの時定数すなわち $\tau_f = R_f C_f$ によって決まることが分かる。入力と出力の位相差はふつう $-180^\circ$ (位相逆転)であり、LLFにおいてはさらに45°遅れる。(3)式か入力側負荷が純抵抗の場合、その値が $R_f/A$ に近くなるまではLLFに影響しない。これはもし、 $C_f$ と $C_i$ が同等ならば、現在対象としている単純なRC回路に比べて、入力側負荷の影響は $1/A$ に減少することを意味している。

例：もし、LLFが1 Hzであるためには、 $R_f$ はどの程度であるべきか？

$A$ が $10^6$ とすれば、 $C_f$ は約1 nFであり、

$$R_f = \frac{1}{2\pi C_f}$$

$$R_f = \frac{1}{2\pi \cdot 10^6 \cdot 10^{-9}} = 1,6 \text{ k}\Omega$$

上の例からチャージアンプの下限周波数が入力側負荷の影響を受けにくいことが分かる。加速度計とコネクタとプリアンプ入力側の合成抵抗を上の例の値まで低下させることはできない。たとえ加速度計を水に侵しても不可能である。

B&K社のチャージアンプのLLFは1Hz以下である。持続時間の長い衝撃や純定常的振動を測定する場合には、LLFの低い事が望まれる。しかしながら、このような測定ができる加速度計はデルタシエ® タイプのものに限られる。他のタイプの加速度計では外部環境から侵入してくる低周波数のノイズのため振動の信号が隠されてしまう。

### 3.2.3 加速度計のケーブルによる入力側の容量負荷

チャージアンプの感度は入力側ケーブルの長さを変えた場合もキャパシタンス変化の影響を受けにくい。非常に長いケーブルを使用した時には高周波数の応答が少し落ちる。

チャージアンプの出力はフィードバックキャパシタンス $C_f$ と圧電素子の電荷 $Q_a$ だけによって決まることは前に述べた。典型的なチャージアンプでは、 $C_f$ の値はふつう100pFから10nFであり、1 nFは出力感度1 mV/pCに相当する。この値は $C_f$ が $AC_f$ と同等の大きさになるまで変わらない。次にケーブル容量が変わってもチャージアンプの感度が変わらない例を示す。

**例：**加速度計とチャージアンプの系の感度変化が1%以下であるためにはケーブル長さはどこまで許されるか？

$C_f$ と $C_a$ を1 nF、 $A$ を $10^{-5}$ とすると、3.2.1 節の(1)式より、

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f + \frac{1}{A} C_i}$$

$$C_i = 0,01 (A + 1) C_f = 0,01 (10^5 + 1) 1 \text{ nF} = 10^3 \text{ nF} = 1 \mu\text{F}$$

このキャパシタンスは100pF/mのケーブル10,000mに相当している。

プリアンプの入力側の大きな容量性負荷によって、プリアンプの高周波数域特性が少し影響をうける。これは入力部のオペアンプの利得が高周波数域で低下するためである。上の解析では $A$ が無限大に大きいとしてチャージ感度を決めしたが、これは近似的なものである。チャージアンプの出力は先に求めた(3)式で下のように表される。

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right) + \frac{1}{A} \left(C_i + \frac{1}{j\omega R_i}\right)}$$



例：高周波数でAが $10^3$ 程度に落ち、フィードバックキャパシタンス $C_f$ が1 nFとする。  
これに入力負荷として20nF(100pF/mの容量をもつケーブル200m)を接続した場合、  
感度は5%程下る。ふつうこの程度の低下は問題にならない。

図3.8はB&K社のチャージアンプの入力側の容量負荷による高周波数域の特性のうける影響を示す。特定のアンプに関しては取扱説明書を参照下さい。

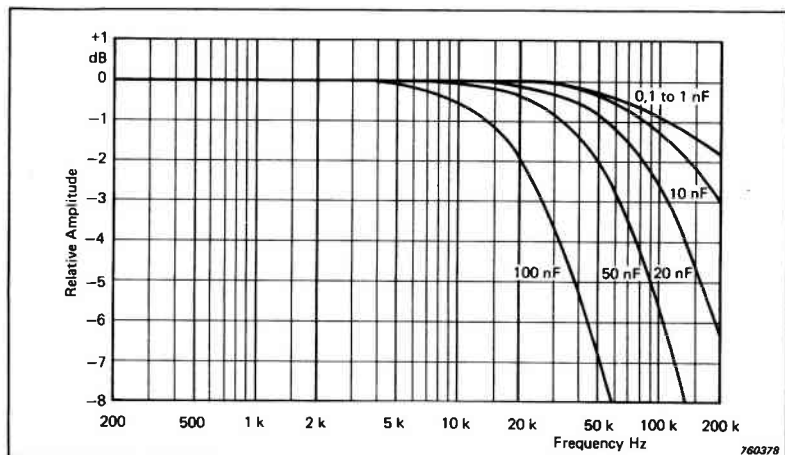


図3.8 B&K社のチャージアンプの高周波域特性に及ぼす容量性入力負荷の影響。

### 3.2.4 電荷の減衰

入力側に並列に他のキャパシタンスが加わってもチャージ感度に与える影響は少ないが、直列にキャパシタンスが加わると加速度計の有効出力電荷が下がる。これは高感度の加速度計で高レベルの振動を測定する場合には望ましい性質である。過大な電荷が加わるとプリアンプの入力側が飽和してしまう。図3.9のように、適当かつ正確なキャパシタンスを線路に直列に入れたり( $C_2$ )、加速度計に並列に入れる( $C_1$ )と、入力側に加わる電荷を減らすことができる。

これと同等の働きをする既製品のチャージ減衰器がB&K社から発売されている。製品番号はWB0726型\*とWB0778型\*でそれぞれ20dBおよび12dB減衰される。

脚注\*これらはブリュエルケアーシステムエンジニアリンググループの開発品で標準品ではない。

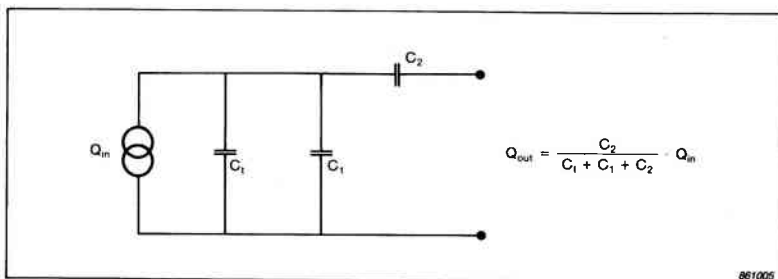


図3.9 チャージ減衰器の構成。

### 3.2.5 チャージアンプ内のノイズ

チャージアンプに非常に長いケーブルを接続すると共に利得を低く設定して使用するとチャージアンプのノイズが増し、測定のSN比が悪くなる。  
 入力側の抵抗負荷が大きく低下した場合にもノイズは増える。

オペアンプの内部ノイズ源のモデルを図3.10に示す。このモデルには外部ノイズ、たとえば摩擦電気、グラウンドループ電圧、ケーブルによる電磁誘導の影響などの効果は含まれていない。これらの効果は3.6節で検討する。

- $Z_I$  = 加速度計とケーブルの等価インピーダンス
- $Z_f$  = フィードバックパスの等価インピーダンス
- $e_n$  = ノイズ電圧
- $i_n$  = ノイズ電流
- $V_o$  = 出力電圧

圧電素子のような高インピーダンスの信号源でフィードバックは主として、容量的である場合には電磁形のノイズの影響は無視できる。3.2.1節で見たように、オペアンプの反転入力部は仮想接地されており電流は流れていない。

$$I = \frac{-e_n}{Z_f} = \frac{e_n - V_o}{Z_f}$$

$$V_o = e_n \left( 1 + \frac{Z_f}{Z_I} \right)$$

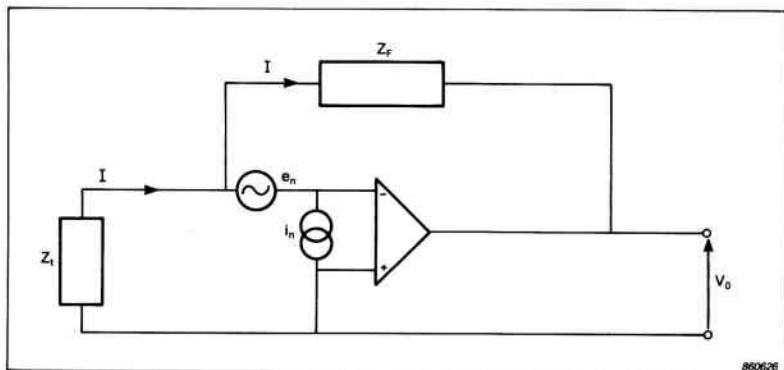


図3.10 チャージアンプに加速度計が接続された場合の等価回路。プリアンプ内部のノイズ源はすべて入力側の電圧源として表現されている。

この式を信号源での信号を表現するように変形するには増幅率 $Z_f/Z_i$ で割る。

$$\begin{aligned} e_s &= -V_o \frac{Z_i}{Z_f} \\ &= -e_n \left( 1 + \frac{Z_i}{Z_f} \right) \end{aligned}$$

中域周波数では信号源と出力側双方におけるインピーダンスは主として容量的であるから

$$\frac{Z_f}{Z_i} = \frac{C_f}{C_i}$$

ここで

$$\begin{aligned} C_i &= C_a + C_c + C_p \\ e_s &= -e_n \left( 1 + \frac{C_f}{C_i} \right) \end{aligned}$$

さらにこの式に $C_i$ を掛けて信号源の容量上の電荷ノイズ $q_i$ が得られる。

$$q_i = e_s \cdot C_i = -e_n (C_i + C_f)$$

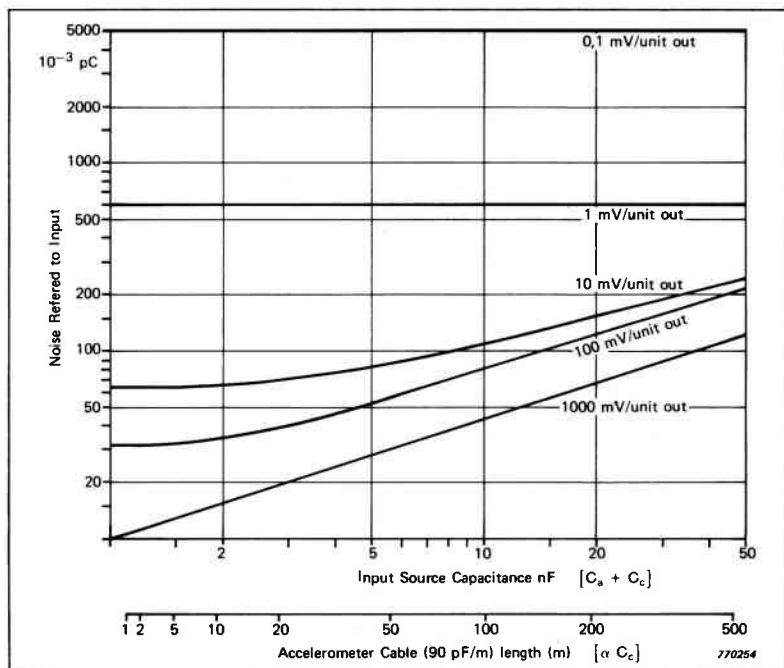


図3.11 B&K社のチャージアンプの2 Hz~100Hz帯域のノイズの入信号源キャパシタンスの影響。

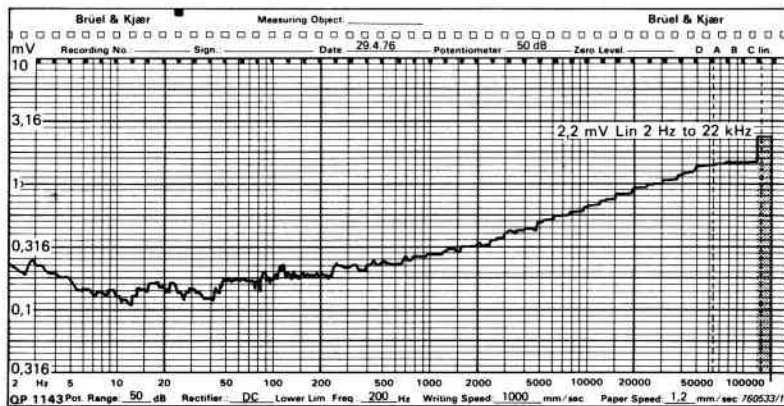


図3.12 B&K社のチャージアンプのノイズ1/3オクターブバンド幅分析。

チャージアンプの感度やLLFは、入力側の容量性や抵抗性負荷によってあまり変化しないが、チャージノイズは $C_i$ や $C_f$ の増加に従って増える。したがって非常に長い入力ケーブルを使用する場合、SN比がいく分低下することは避けられない。図3.11にB&K社のあるチャージアンプの入力側ノイズレベルに対する入力側キャパシタンスの影響を示す。他のチャージアンプも同様の特性を持っている。

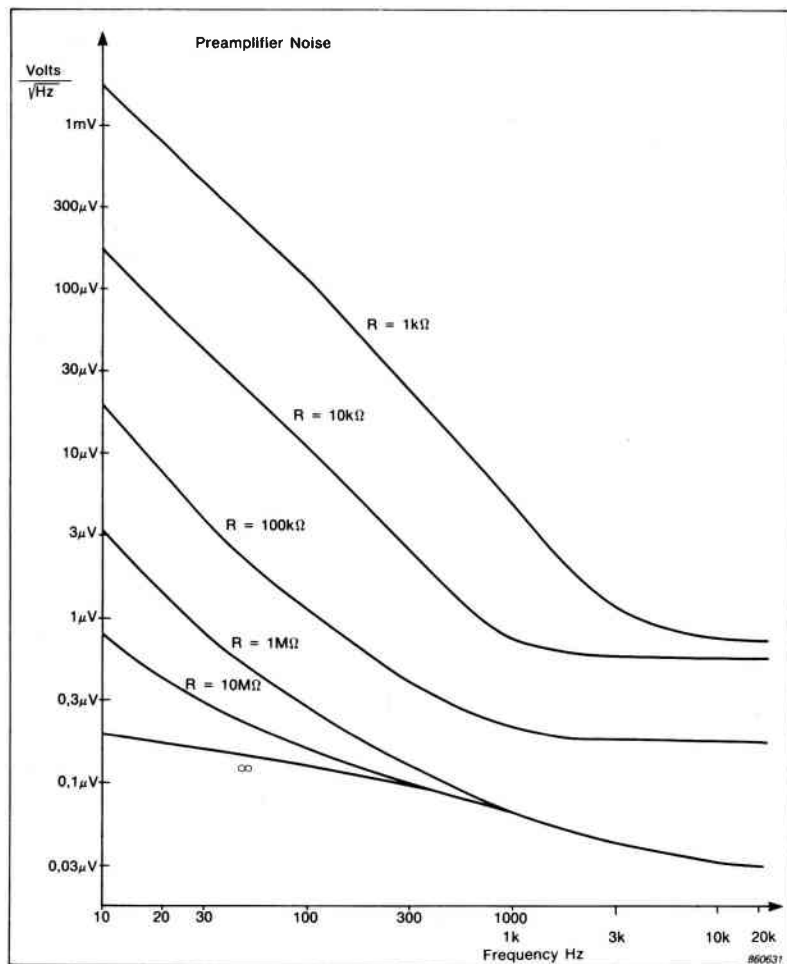


図3.13 チャージアンプの入力抵抗とノイズの関係。

$C_f$ がプリアンプの利得を決定しているので、フィードバック容量が大きい低利得のときにはノイズは大きくなるだろう。高利得の加速度計とプリアンプを高利得にしたとき測定系のSN比が良好になる。

ケーブルが機械的な振動を受けるときはケーブル自身がノイズを発生することを忘れてはいけない。一般にB&K社の低ノイズケーブルを使うべきである。これは特に低レベルの測定をするとき大切である。測定ケーブルはきちんと止めなくてはならない。(4.6節参照)

低周波数(<100Hz)ではアンプからのノイズは周波数に反比例して増す。これはオペアンプの性質であり、ハイパスフィルタを使えば減らすことができる。図3.12はB&K社のチャージアンプのノイズを1/3オクターブ分析したものである。

もし、入力側の抵抗性負荷が10M $\Omega$ 以下に落ちると、チャージアンプからのノイズは低周波数域のノイズ増加の主要因となる。このノイズ源を解析するには入力側要素類とその相互作用についてのくわしい知識が必要である。図3.13は狭帯域プリアンプと入力抵抗の関係を実験的に調べたものである。図ではノイズはバンド幅の平方根に対する電圧の割合で表されている。

### 3.3 電圧プリアンプ

電圧プリアンプの出力電圧は入力電圧に比例し、加速度計は電圧源として扱われる。ケーブルのキャパシタンスの変化は系の感度の変化を引き起こす。入力抵抗の変化は低周波数特性の変化の原因になる。

電圧プリアンプは加速度計の容量の両端に発生した変動電圧を検出し、これに比例した電圧を出力する。電圧プリアンプはチャージアンプよりも設計が容易であるが、使用する上で欠点がある。B&K社ではこのタイプのプリアンプは1機種しか生産していないので、使用法の説明は相対的に簡単な範囲に止める。

### 3.3.1 電圧感度

圧電型加速度計を電圧アンプに接続した場合の等価回路を図3.14に示す。この回路を図3.2に示した回路と比べると、オペアンプの接続法以外は同じである。この場合、オペアンプは利得1 ( $V_o = V_i$ )の電圧バッファとして使われている。非常に高い入力インダクタンスは $C_p$ と $R_p$ で表されている。記号は図3.2や図3.3と同じである。

図2.8では加速度計がケーブルやプリアンプに接続されていない場合、出力電圧は次のようになる。

$$V_a = \frac{Q_a}{C_a}$$

ここで $R_a$ は並列に接続された高抵抗でふつうは無視できる。3.22節からプリアンプの入力側の入力電圧は次のように書ける。

$$V_i = \frac{Q_a}{C_a + C_c + C_p}$$

したがって、

$$V_o = V_i = V_a \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p}$$

上の式はチャージ感度 $S_{qa}$  [ $\text{pC}/\text{ms}^{-2}$ ]と電圧感度 $S_{va}$  [ $\text{mV}/\text{ms}^{-2}$ ]で表現すると、下のように示される。

$$\begin{aligned} S_{va} &= \frac{S_{qa}}{C_a + C_c + C_p} \\ &= S_{va(\text{open})} \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p} \end{aligned}$$

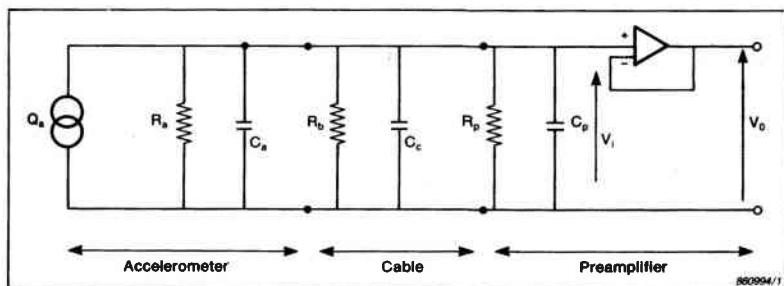


図3.14 圧電素子を電圧源と見なした電圧アンプの等価回路。

ここで $S_{va}(\text{open})$ は加速度計の解放電圧感度である。

チャージ感度 $S_{qa}$ と $C_a$ は加速度計に固有の値であるから電圧感度 $S_{va}$ はケーブルのキャパシタンスに依存する。この性質は望ましくない。なぜなら電圧アンプを使用する場合には電圧感度を問題にすると、加速度計に接続するケーブルはあらかじめ較正された決まったものを使わなければならないからである。もしケーブルを変えた場合には較正し直さなければならない。次にこれに関する例を挙げる。

**例** 振動測定をしようとする、長くて丈夫なケーブルが必要になる。標準ではB&K社の1.2mのケーブルAO0038型と3mの強化ケーブルAO0122型がある。この場合の電圧感度を計算してみよう。

$$\begin{aligned} \text{ケーブルAO0038型のキャパシタンス} &= 110 \text{ pF} \\ \text{加速度計のキャパシタンス(ケーブルを含む)} &= 1117 \text{ pF} \\ \text{チャージ感度} &= 9,8 \text{ pC/ms}^{-2} \\ \text{電圧感度} &= 8,76 \text{ mV/ms}^{-2} \end{aligned}$$

この値から圧電素子単体でのキャパシタンス $C_a$ は

$$C_a = 1007 \text{ pF}$$

アクセサリケーブルAO0122型のキャパシタンス $C_c$ は代表値260pFである。こケーブルを接続した場合の電圧感度は次のように計算される。

$$\begin{aligned} S_v &= \frac{9,8 \cdot 10^{-12}}{(1007 \cdot 10^{-12}) + (260 \cdot 10^{-12})} \\ &= 7,73 \text{ mV/ms}^{-2} \end{aligned}$$

電圧感度はケーブルを変えただけで11%下がった。

このような入力キャパシタンスによる感度の変化は辛抱できない程不便という訳ではない。しかし長いケーブルを使うとSN比が下がることに注意しなければならない。非常に長いケーブルを使った場合、アンプ入力電圧は開放出力電圧の何分の1かに下がってしまう。

### 3.3.2 下限周波数

3.3.2節の下限周波数の取扱と同様にして、-3dB点の下限周波数は次のように表される。



$$f_l = \frac{1}{2\pi R_t C_t}$$

ここで

$$C_t = C_a + C_c + C_p$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_p}$$

有効測定範囲が1 Hz以下になるようにLLFを定めるためにはRCは非常に大きくなければならない。理論的には2つの方法が考えられる。

1. 全キャパシタンスをできるだけ大きくする。この場合加速度計の $C_a$ は一定であるので、 $C_c$ を大きくするには長いケーブルを使用する。しかしながら、この場合電圧感度が低下し、ダイナミックレンジも悪くなるので実用的ではない。
2. プリアンプを高入力抵抗に設計する。普通、電圧アンプを使用する場合にはこの方法がとられる。しかし、何らかの理由で入力抵抗が下がるとLLFは上昇する。たとえば加速度計の出力コネクタが湿った場合などが相当する。すなわち洩れ抵抗が下がり、入力側がこの抵抗によりシャントされて入力抵抗が下がるのである。

### 3.3.3 電圧プリアンプのノイズ

チャージアンプの場合とは違って、電圧プリアンプによるノイズは入力キャパシタンスに無関係であるので、ゲインの設定値やケーブルの長さによって、入力側のノイズが変わることはない。しかしケーブルが長くなる程、電圧感度は低下するので、SN比は悪くなるため、実際は長所とは言えない。

### 3.4 プリアンプの出力ケーブル

チャージアンプの場合も電圧アンプの場合も、次段の測定計器を駆動するのに十分な出力電流を供給する能力がなければならない。この駆動電流を発生するのに必要な電圧はオペアンプの出力側から出て、出力ケーブルのインピーダンスを経て伝えられる。

プリアンプの出力側に高キャパシタンスの負荷が接続されていれば、最大出力電圧幅が減少することがあり得る。このような事は非常に長いケーブルを用い、高周波数の信号を扱うときに問題となる。たとえば、10kHzの信号に対して、負荷が20nF (100pF/mのケーブル200m分) を越える場合には出力振幅の減少が起こるだろう。

時には出力電圧振幅の減少はプリアンプの出力能力不足によって生じる。もし、代表値として出力電流が8mAで負荷が20nFの場合10kHzにおいてインピーダンスは約796Ωになり、ピーク電圧は6.37Vになる。振動レベルと加速度計の感度とプリアンプの感度の組み合わせによってはこれより大きい出力となるが、振幅は上の値に制限される。B&K社のチャージアンプの高周波数域におけるこのようなケーブルのキャパシタンスによる影響を図3.15に示す。

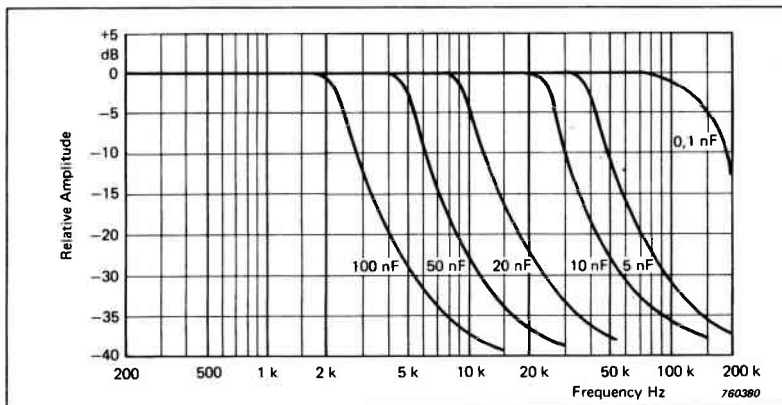


図3.15 B&K社のチャージアンプの高周波数域応答に及ぼす出力側の容量負荷の影響。

### 3.5 ラインドライブシステム

ラインドライブアンプは基本的にチャージアンプや電圧アンプの前段部に相当し、加速度計内に組み込むことができる。B&K社のラインドライブ加速度計を図3.16に示す。また従来型の加速度計に直接取り付けたり、加速度計の近くに置くことができる分離型のラインドライブアンプもある。2644型ラインドライブアンプを離して使用することによって、ラインドライブアンプを組み込んだ加速度計やラインドライブアンプを上に乗せた加速度計よりも高レベルの振動測定や高温環境下での測定ができる。図3.17にB&K社のラインドライブアンプ2644型を示す。

ラインドライブアンプは外部の電源からの電力で駆動しなければならない。B&K社のラインドライブ加速度計やプリアンプの電源として、ラインドライブ電源2813型がある。これは電池を使用して同時に2個のラインドライブ加速度計に電力が供給できる。図3.18に2813型を示す。2813型の電圧出力は測定器や解析機器の入力に使用できる。これと同様のラインドライブ電源はいくつかのブリュエル・ケアーの振動や信号分析器に組み込まれている。



図3.16 B&K社のラインドライブ加速度計。左から4390型、8317型、8318型。写真倍率はそれぞれ1 : 1、1 : 1、1 : 2である。



図3.17 加速度計上部へのラインドライブアンプ2644型の取り付け。

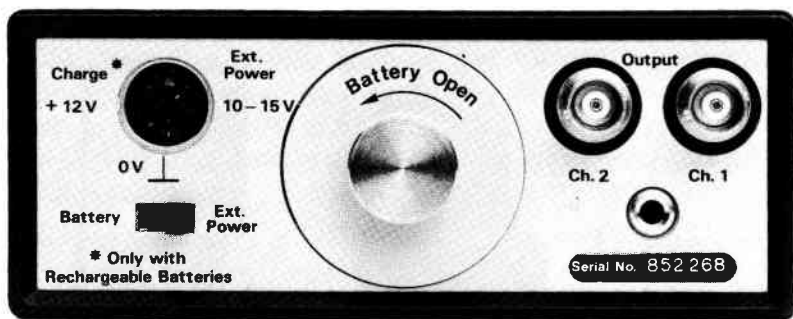


図3.18 2813型2チャンネルラインドライブ電源。

プリアンプが加速度計に組み込めるようになったのはごく最近のことである。最初にこのようなシステムが設計されたのは水晶を圧電素子として使用した時で非常にキャパシタンスが低く、感度も低い加速度計に用いるためであった。このような加速度計はケーブルから発生する摩擦電気ノイズやケーブルから侵入する電磁誘導ノイズに非常に敏感である。

現在の圧セラミックと低ノイズケーブルを用いた加速度計では初期の問題はほとんど解決されたけれども、加速度計がノイズの多い環境で使用される場合には組み込みタイプのプリアンプや加速度計近くに取りつけて使用するラインドライブプリアンプは役に立つ。以上のような訳でラインドライブプリアンプは工場のような生産現場で使用されることが多い。そのような所では、非常に長く安価なケーブルを用いて低インピーダンスの信号を送るのに適している。このようなシステムではグラウンドループ電圧とケーブルノイズに対する感度は他のどんな振動プリアンプを使った場合よりも低い。これについては3.6節に述べる。

組み込み回路の特性が不適当なために性能に問題のあるラインドライブ方式もあった。しかし、厚膜回路技術の発達によってB&K社の加速度計には高品質のプリアンプが組み込まれている。

加速度計に回路を組み込んだために、加速度計の使用温度範囲やダイナミックレンジに制約が生じる。勿論、加速度計にラインドライブプリアンプを取りつける場合も同じである。軽い板や類似のものに加速度計を取りつける場合にはプリアンプによる質量増加分も考慮しなければならない。

かつては別のラインドライブ方式も用いられたが、現在ではほとんど全てのシステムではプリアンプ電源の接続に2本導線ケーブルを用い、電力と振動信号を同時に伝える。駆動電源は定電流または定電圧源のどちらかを用い、入れ換えることはできない。B&K社のラインドライブシステムでは定電圧電源を用い、振動信号の伝送には電流変調を利用している。この方式は定電流源方式よりも優れていることがわかっている。

### 3.5.1 B&K社のラインドライブ加速度計とラインドライブ電源

ラインドライブ加速度計の感度は組み込まれたラインドライブアンプの出力の電流感度 ( $\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$ ) で表される。電源ユニットの出力側の最終感度は電流感度に電源ユニットの感度 ( $\text{mV}/\mu\text{A}$ ) を掛ければ得られる。

たとえば、感度  $3.16 \mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$  のラインドライブ加速度計をラインドライブ電源2813型に接続すれば総合感度は  $3.16 \text{mV}/\text{ms}^{-2}$  になる。

### 3.5.2 B&K社のラインドライブアンプとラインドライブ電源

加速度計のチャージ感度 ( $\text{pC}/\text{ms}^{-2}$ ) はまず2644型プリアンプ (チャージ  $\text{pC}$  に比例した電流  $\mu\text{A}$  出力) によって、電流出力感度 ( $\mu\text{A}/\text{pC}$ ) に変換される。次に前節で述べたように2644型の出力に電源ユニット感度を掛けて、最終的に  $\text{mV}/\text{ms}^{-2}$  の感度が得られる。

たとえば、チャージ感度  $3.16 \text{pC}/\text{ms}^{-2}$  の加速度計を2644型と2813型と接続して使うと、前と同じように  $3.16 \text{mV}/\text{ms}^{-2}$  の総合感度が得られる。

## 3.6 外部ノイズに対する種々のプリアンプの感度比較

多チャンネルの測定系ではしばしば、グラウンドループや長いケーブルが問題となる。したがって、種々の測定システムの外部ノイズに対する感度を比較し、その環境下で最適のシステムを選ぶことは重要である。

次の数種のシステムについて以下で比較を行う。

1. 普通に接地された (すなわち絶縁されていない) 加速度計とチャージアンプの組み合わせ。
2. 接地された加速度計と浮動入力のあるチャージアンプ。
3. 定電圧電源と電流変調を行うB&K社のラインドライブシステム。
4. 定電圧電源と、電流変調と浮動入力を用いるB&Kのラインドライブシステム。

5. 定電流ダイオードを用いた電圧ラインドライブシステム(B&Kの製品にはない)。
6. 差動チャージアンプを用いた平衡型加速度計。

上記のシステムに加えて、絶縁固定法(たとえばマイカ座金)すなわち加速度計を電氣的に絶縁する方法も検討する。

以下の解析では入力側ノイズは2種類の原因の組み合わせで発生すると考える。

1. 摩擦電気効果 すべての同軸ケーブルは動かないように固定されていなければ電荷を発生する。解析結果を比較するために、下記のどの場合もケーブル中に100pCのチャージノイズを発生するものと仮定する。解析では摩擦電気効果は完全電荷源として扱う。この減少はケーブルを振動面に固定し、低ノイズケーブルを使わなければもっとはっきりと現れる。

注：100pCの摩擦電気というのはかなり極端な値であるが、ここではシステム環境の相互比較のために用いている。

2. グランドループ 大きな機械では機械本体がアース電位でない事がよくある。その結果、加速度計もケーブルの金網もアース電位ではなく、ケーブルに沿って電位差が存在する。解析結果の比較のためにこの電圧降下分 $e_n$ を1Vと仮定する。

上記の2つの減少に加えて電磁障害(EMI)もシステムのノイズの原因になる。高インピーダンスで弱い信号の流れるシステムで電源が複数個ある場合はこのEMI対策の不適切な例である。もう一つの典型的な例は電源ラインと信号線が長距離にわたって平衡している場合である。発生したノイズ信号は容量的結合分と誘導的結合分に分けられる。もし、高電圧のシステムから接地線に対して、わずかなキャパシタンスがあるとノイズが直接的に入力信号に混じってくる。この種のEMIに対してラインドライブシステムはチャージシステムより通常の電源周波数に関しては影響を受けにくい。

誘導結合は加速度計のケーブルが大電流の流れているケーブル近くにあれば必ず問題になる。この結合は高周波成分程大きい。高速スイッチや他の高周波成分を含む電流からのスパイク電流は電磁障害のよくある例である。この影響を低減するのに磁気シールドが有効である。ツイストペアのケーブルはケーブルに作用する合磁束がゼロに近くなるので有力な手段である。実用上は同軸ケーブルが予防用の用いられる。

電磁障害によるノイズは普通はグラウンドループからのノイズとは大きさが全く異なる。代表的な結合パラメータは挙げにくいので、以下の例ではグラウンドループと摩擦電気によるノイズだけを検討する。

Accelerometer + Preamplifier Description	Relative Sensitivity to external noise (dB)		Relative Sensitivity to external noise with the addition of an insulated base on the accelerometer (dB)	
	Ground loop noise	Tribo- electric noise	Ground loop noise	Tribo- electric noise
Normal accelerometer grounded input charge amplifier	0 (ref. 1000 pC/V)	0 (ref. 100 pC)	-130	0
Normal accelerometer "floating" input charge amplifier	-70	0	-80	0
Brüel & Kjær line-drive accelerometer Brüel & Kjær line-drive power supply	-26	-80	-154	-80
Brüel & Kjær line-drive accelerometer "floating" input Brüel & Kjær Line-drive power supply	-70	-80	-134	-80
Line-drive accelerometer constant current line-drive supply - (non-Brüel & Kjær)	0	-80	-130	-80
Balanced accelerometer Differential Charge Amplifier	-60	0	-60	0

T01158GB1

表3.1 数種の加速度計とプリアンプの組み合わせの外部ノイズに帯する耐性の比較。

どんな場合でもノイズは接続された測定器列の最終段の機器に対する入力になる。(たとえば、チャージアンプに対しては等価電荷、定電圧のラインドライブ電源に対しては等価電圧の入力となる。)これらの等価入力値に最終段の機器の感度を掛ければ総合感度が得られる。

以下の解析の結果はシステムの相互比較が分かり易いように表にして示す。(表3.1)ノイズ感度はデジベルで表されているが、普通のプリアンプに絶縁していない加速度計を接続した場合を基準値としている。したがって負の値はノイズ感度が低く、外部ノイズに強いことを意味する。

表3.1には2つの基準値が与えられている。1つはグラドループノイズ感度で、もう1つは摩擦電気ノイズ感度である。感度は同じ種類に対する感度を比較する。基準レベルは表中に示されている。

### 3.6.1 接地された加速度計とチャージプリアンプ

図3.19は接地された加速度計とプリアンプに電荷と電圧のノイズ源が考慮された等価回路である。電荷と電圧と容量の基本的関係とオームの法則と前節で述べたノイズのレベルを用いて、プリアンプ入力での等価電荷ノイズを表すことができる。それぞれのノイズ源は独立しているとする。

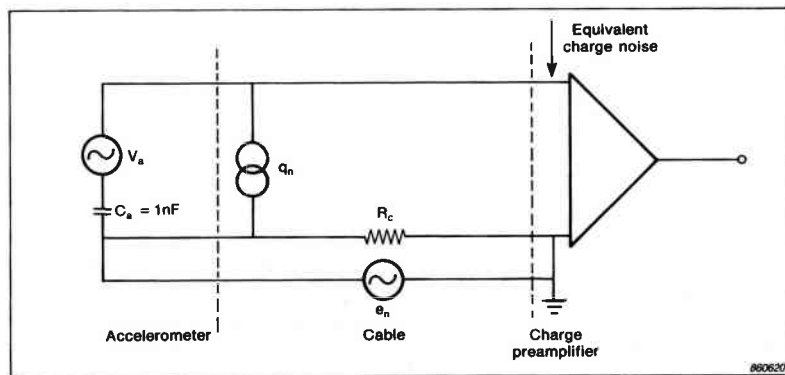


図3.19 接地された加速度計を入力側で接地されたチャージアンプに接続した場合の簡単な等価回路。



### グラドループノイズ

これは単にノイズ電圧と加速度計のキャパシタンス ( $C_a=1nF$ ) の積である。すなわち  $100pC/V$ 。

### 摩擦電気ノイズ

これはすでに  $100pC$  と仮定した。

これから分かるようにグラドループのノイズの方が摩擦電気によるものよりはるかに大きい。

### 3.6.2 接地された加速度計と浮動入力付チャージアンプ

2651型チャージアンプはいわゆる“浮動入力”をオプションで付けることができる。ふつう全てのB&K社のプリアンプは“接地入力”が使用されている。浮動入力の場合はプリアンプの入力に第2のオペアンプが入っているので解析は少し複雑になる。この場合の等価回路を図3.20に示す。

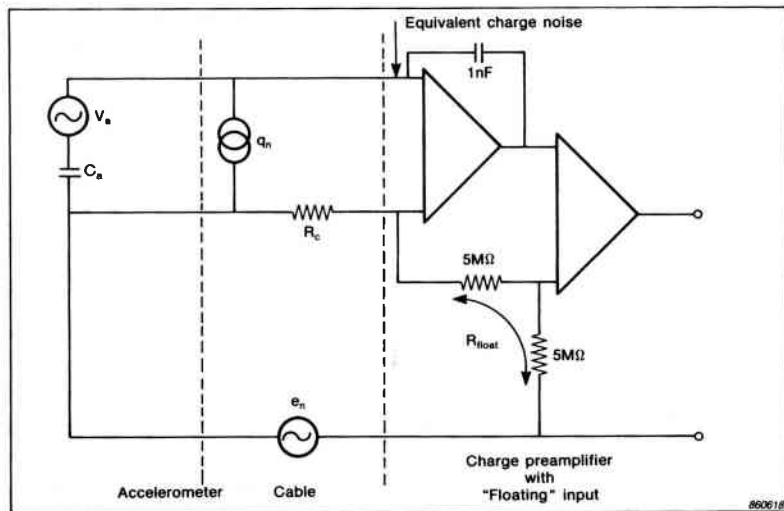


図3.20 フローティング入力のあるチャージアンプに接地された加速度計が接続された場合の簡単な等価回路。

### グラドループノイズ

グラドループノイズを計算するためには第2のオペアンプの同相成分除去比(CMRR)を考慮する。今の場合CMRRは約70dB( $0.3 \times 10^{-3}$ 程度)である。ケーブルからのノイズは第2のオペアンプの前で、電圧をケーブルの直列抵抗 $R_c$ とアースへの高抵抗 $R_{float}$ で分割したものである。 $R_c$ の代表値は $R_c = 0.05 \Omega / m$ である。“浮動”入力付アンプの出力に対応する電荷は電圧をチャージアンプの感度 $1 \text{ mV} / \text{pC}$ で割って得られる。

こうして、入力における等価電荷ノイズは下の式のようにになる。

$$C_a \frac{R_c}{R_{float} + R_c} \cdot e_n + \frac{CMRR}{1 \text{ mV/pC}} \frac{R_{float}}{R_{float} + R_c} e_n$$

この式に現実的な値を入れ、200mのケーブルが接続されていると考えれば、グラドループノイズ感度は $0.301 \text{ pC} / \text{V}$ になる。

### 摩擦電気ノイズ

これは第2のオペアンプには無関係であるので $100 \text{ pC}$ である。

このシステムでは“浮動入力”によってグラドループによるノイズは効果的に除去できることが分かった。その結果摩擦電気によるノイズが重要になる。

### 3.6.3 B&K社のラインドライブアンプと電源(接地入力)

図3.21はラインドライブアンプすなわち2813型のようなラインドライブ電源に加速度計を接続した場合の等価回路である。この場合電源の入力側での等価電流ノイズの式を作らなければならない。ラインドライブアンプの感度は $1 \mu\text{A} / \text{pC}$ に固定されている。またラインドライブアンプの出力インピーダンスは $20 \text{ k}\Omega$ にセットされている。

### グラドループノイズ

$$Q = \frac{e_n}{R_0 10^{-6} [A / \text{pC}]}$$

$[A / \text{pC}]$ で割るのは単に入力側の等価電流ノイズをラインドライブアンプの入力側の等価電荷ノイズに変換するためである。これより等価ノイズ感度として $50 \text{ pC} / \text{V}$ が得られる。

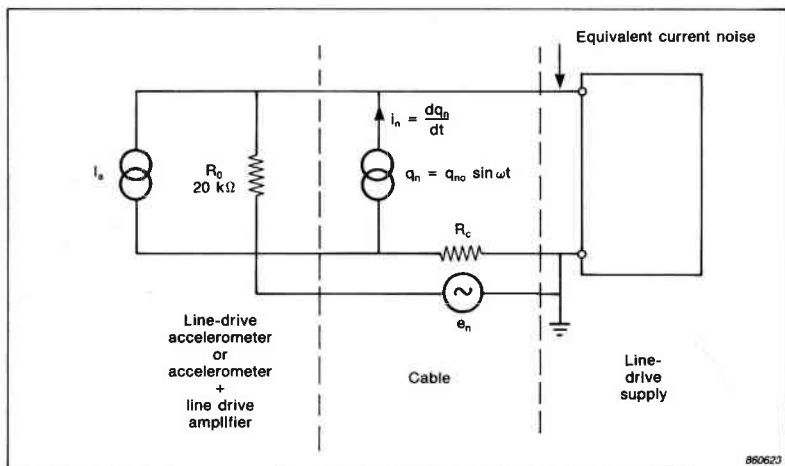


図3.21 接地されたB & Kのラインドライブ加速度計をラインドライブ電源に接続した場合の簡単な等価回路。

### 摩擦電気ノイズ

機械的な低周波数の振動がケーブルに加わって発生する摩擦電気によって電流が流れるとすると、電源に流れ込むノイズ電流 $i_n$ は次の式で表される。

$$i_n = \frac{dq_n}{dt} = \omega q_{no} \cos \omega t$$

電源の感度を考慮すれば、この式から16Hz( $\omega=100$ )のとき摩擦電気ノイズ感度は $10^{-2}$  pCになり、この値は周波数とともに大きくなる。3.6.1節の普通のチャージアンプと同じ摩擦電気ノイズ感度になるにはケーブルの振動周波数は160kHzになる。これから分かるように、ラインドライブ式のシステムでは普通のチャージアンプのシステムに比べると、摩擦電気ノイズに対する性能が大幅に改善される。

一方、グラドループ干渉によって生じるノイズは摩擦電気によるものも1000倍も大きい。ラインドライブシステムは普通のチャージアンプシステムに比べれば総合的なノイズ耐性ははるかに良い。たとえ「浮動」入力のチャージアンプと比べても、もし摩擦電気ノイズがある場合には浮動チャージアンプの方がノイズ耐性が優れている。

### 3.6.4 B&K社のラインドライブ加速度計と電源(“浮動”入力)

3.6.2節で述べたチャージアンプと同じ方法でラインドライブ電源の入力を“浮動”させることができる。この機能を持ったものは2813型である。図3.22にその等価回路を示す。この回路は等価浮動抵抗  $R_{float}$  ( $\sim 20k\Omega$ ) が存在する以外は前の例と同じである。これは2813型の中のオペアンプによるものである。前と同様にグランドループ電圧は70dBである。これに20mのケーブルを接続すると仮定する。

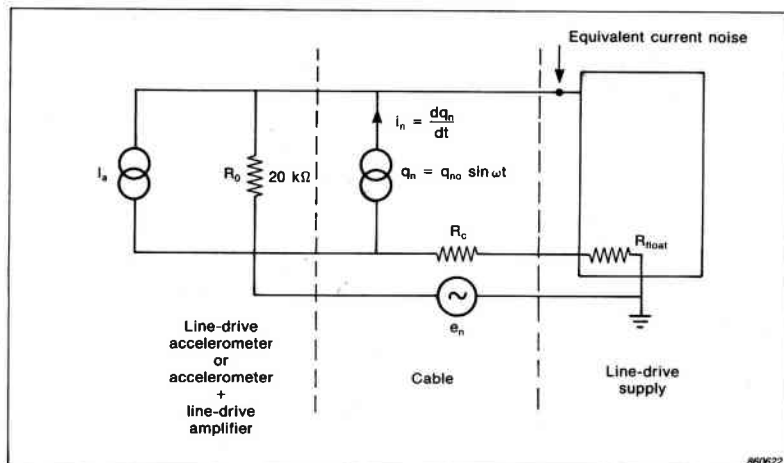


図3.22 接地されたB&Kのラインドライブ加速度計を“浮動”入力付のラインドライブ電源に接続した場合の等価回路。

#### グランドループノイズ

$$q_n = \frac{e_n \frac{R_c}{R_{float}}}{R_o [\Omega] 10^{-6} [A/pC]} + \frac{e_n [V]}{CMRR 1 [mV/pC]}$$

この式からグランドループ電圧に対する感度0.325pC/Vが得られる。これは“浮動”入力を持った普通のチャージアンプの値とおなじくらい小さい。

#### 摩擦電圧ノイズ

摩擦電圧ノイズ感度は浮動入力の場合も変わらないので前節と結果は同じである。

### 3.6.5 定電流電源によるラインドライブシステム

B&K社ではこのタイプのシステムは使わない。この電源はB&K社の2813型のような定電圧、電流変調方式の電源より簡単である。ここでケーブルノイズは電磁場によって誘導されることを強調しておく。これは安価な二芯ケーブルを使用した場合に特にはっきり表れる。以下の説明によって、定電流電源によるラインドライブシステムはB&K社のシステム程ケーブルノイズに強くないことが分かるだろう。ラインドライブシステムのタイプにかかわらず強い電磁場がある所では、同軸ケーブルを使用することの主な理由は電磁場の降下を抑えられるので、安価な二芯ケーブルが使えるという事を考えればこれは非常に重要である。

図3.23は定電流型システムの等価回路である。

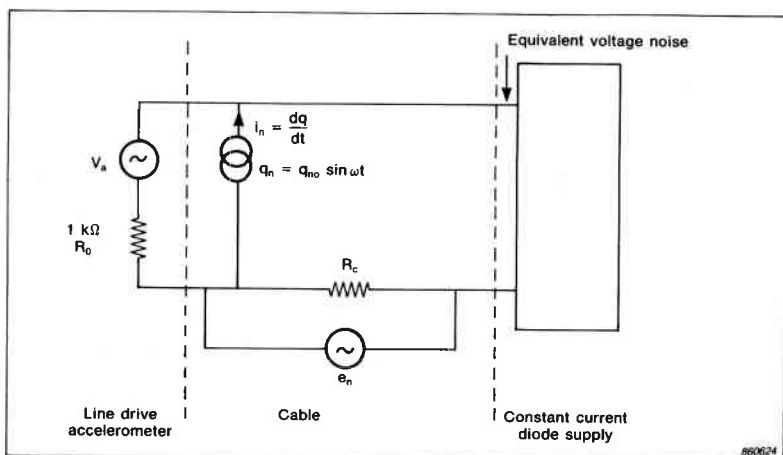


図3.23 定電流型電源を使用したラインドライブシステムの簡単な等価回路。

#### グラウンドループノイズ

グラウンドループ電圧は電源の入力部に直接作用する。もし、ラインドライブアンプの感度が  $1\text{ mV/pC}$  ならば、ノイズ感度は  $1000\text{ pC/V}$  である。これはB&K社のラインドライブシステムより劣っている上普通のチャージアンプと変わらない。

#### 摩擦電気ノイズ

$$q_n = \frac{i_n R_o}{1 [\text{mV/pC}]}$$

$$= \frac{R_o \omega q_{no} \cos \omega t}{1 [mV/pC]}$$

16Hzでケーブルが振動するとき、摩擦電気による電荷ノイズは約 $10^{-2}$  pCであるから、B&K社のラインドライブシステムと同等である。

### 3.6.6 平衡型加速度計と差動チャージアンプ

平衡型加速度計では圧電素子と加速度計の容器部分が絶縁されている。図3.24にこのシステムの等価回路を示す。電荷取り出し部と加速度計容器部の間にはキャパシタンス $C_n$ がある。動作状態ではこれらのキャパシタンス中に不平衡が存在し、これを $\Delta C_h$ とする。

ケーブルの外側のシールドメッシュと内側の2本の導線周囲のシールドメッシュの間のキャパシタンスを $C_s$ とすると、これは両方のシールドメッシュに等分されている。

2本の導線を包む絶縁物のキャパシタンスを $C_d$ とし、不平衡分を $\Delta C_d$ とする。

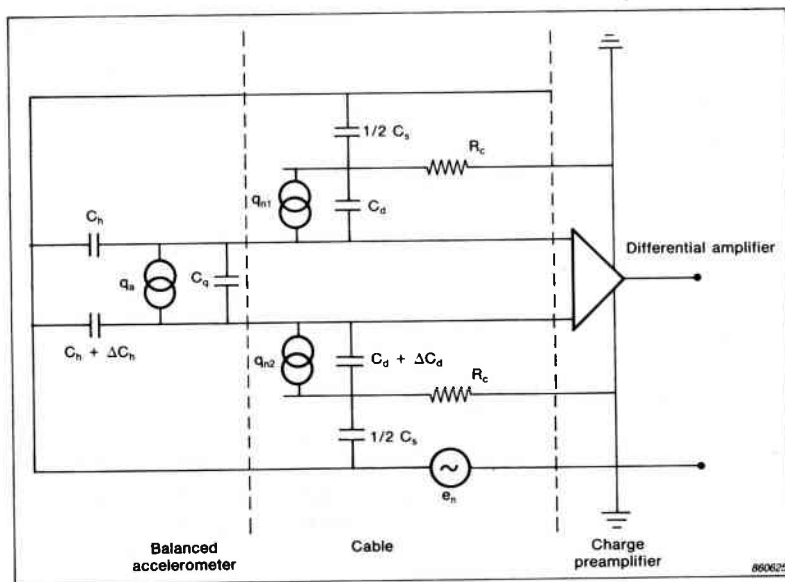


図3.24 差動チャージアンプに平衡加速度計を接続した場合の簡単な等価回路。

摩擦電荷 $q_{n1}$ と $q_{n2}$ は相関がないので平衡しない。

圧電素子の電極部の間の不平衡が1 pFある場合、 $\Delta C_h = 1$  pFで、等価電荷ノイズは1 pC/Vとなる。

50Hzにおいて $C_s$ と $R_c$ の間のインピーダンスの比は大きいのでケーブルの不平衡は変換器の不平衡の $10^{-8}$ 程度であり、無視できる。

摩擦電荷はふつうの加速度計とチャージアンプの組み合わせの場合と同じ大きさのチャージノイズを起こす。

### 3.6.7 加速度計の絶縁取付けがノイズに及ぼす影響

加速度計を取付け対象と絶縁することができる。(4.4節参照)加速度計を絶縁するには、加速度計の下にマイカワッシャを用いるか、加速度計のベースを絶縁物で作ればよい。平衡型加速度計と浮動入力チャージアンプを除けば、これによって、グラドループノイズが改善できる。

明らかにケーブルに発生する摩擦電気ノイズは絶縁取付けとは無関係であるので、摩擦電気ノイズ感度は変わらない。複雑な回路解析をするまでもなく、表3.2に示すノイズ感度が得られる。

Insulated Accelerometer and Preamplifier Description	Ground loop noise Sensitivity pC/V
Normal accelerometer and charge preamplifier	$0,3 \times 10^{-3}$
Brüel & Kjær line-drive accelerometer and supply (grounded input)	$0,02 \times 10^{-3}$
Brüel & Kjær line-drive accelerometer and supply ("floating" input)	$0,2 \times 10^{-3}$
Line-drive system based on constant current supply	$0,3 \times 10^{-3}$

T01163GB1

表3.2 加速度計を取り付け対象と絶縁した場合のいくつかの加速度計/プリアンプの組み合わせのグラドループノイズ感度の比較。

### 3.7 プリアンプに付加される機能

B&K社のチャージアンプやプリアンプ入力をもつ振動測定器は次に述べる機能のいくつかを備えている。B&K社のプリアンプにどの機能が付いているかは図3.25から分かる。別の型のプリアンプに関してはAppendix Eに詳細がある。

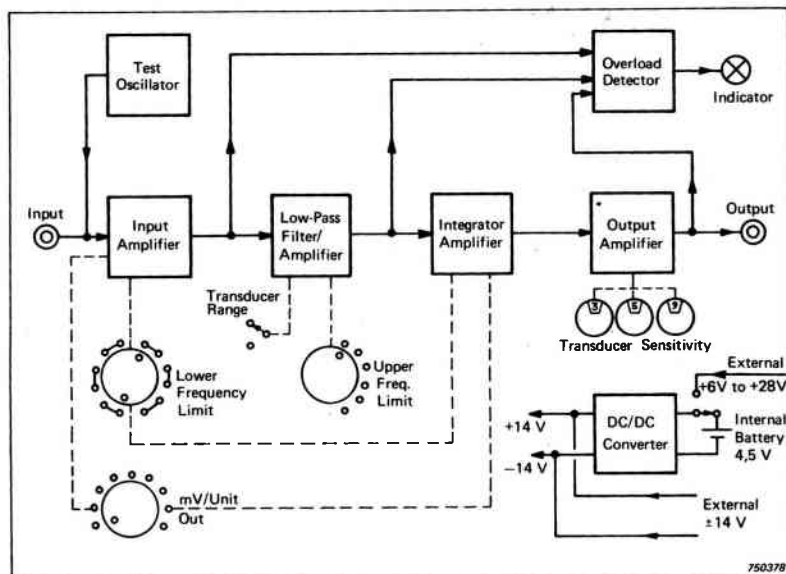


図3.25 B&K社チャージアンプ内部のブロック図。

#### 3.7.1 積分回路

振動を加速度で測定することの利点は多いが速度や変位を得るために加速度信号を積分しなければならない。振動をどの物理量で測定するかを選択については第1章で述べた。ここでは信号の積分について検討する。

正弦波状の信号については加速度、速度、変位の各パラメータ間の関係は明らかである。信号の周波数に比例する量でこれらの物理量を割れば積分量が得られる。

加速度信号が次の式のように正弦波で表されるものとする。



$$a = a_0 \sin \omega t$$

ここで

- $a$  = 時刻 $t$ における加速度
- $a_0$  = 加速度の振幅
- $\omega$  = 角周波数(ラジアン/sec.)

1回積分して速度が得られる。

$$\begin{aligned} v &= \int a dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega} \cos \omega t \\ &= v_0 \cos \omega t \end{aligned}$$

ここで

$$v_0 = \frac{-a_0}{\omega}$$

ここで積分定数はゼロとしているが過渡信号を積分するときは正しくない。

もう一度積分すると変位が得られる。

$$\begin{aligned} x &= \int v dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega^2} \sin \omega t \\ &= x_0 \sin \omega t \end{aligned}$$

ここで

$$x_0 = \frac{-a_0}{\omega^2}$$

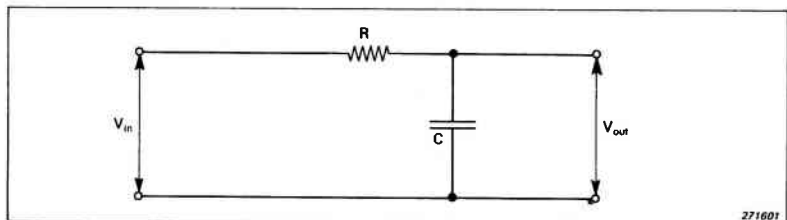


図3.26 簡単なRC積分回路。

上の積分結果から、速度は加速度を周波数に比例する量で割れば得られ、変位は周波数の2乗に比例する量で割れば得られることが分かる。

図3.26に電氣的な積分を行う最も基本的な回路を示す。

加速度計やプリアンプから電圧 $V_{in}$ が入力にくわえられると、コンデンサの電圧 $V_{out}$ は次のようになる。

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 + j\omega RC}$$

ここで  $\omega RC \gg 1$

$$V_{out} \approx \frac{1}{jRC} \frac{V_{in}}{\omega}$$

先の積分と上の式を比較すれば、電氣的に積分が行われたことが分かる。 $1/RC$ という係数の値は校正して得られる。変位を得るためにはもう一段積分回路を接続して、2重積分する。

上の式絶対値を周波数に対してプロットすれば周波数応答は図3.27のようになる。図から明らかなように、積分が出来る下限周波数 $\omega_L$ が存在する。また $\omega_T$ より大きい周波数成分だけが本当に積分される。

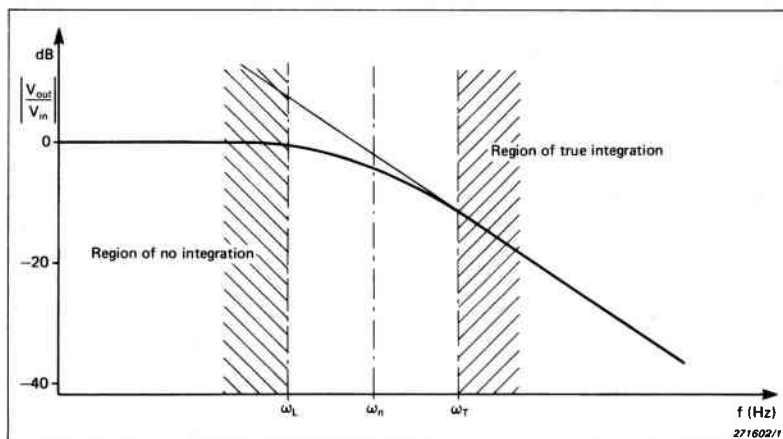


図3.27 周波数の関数として表した積分された信号の質。

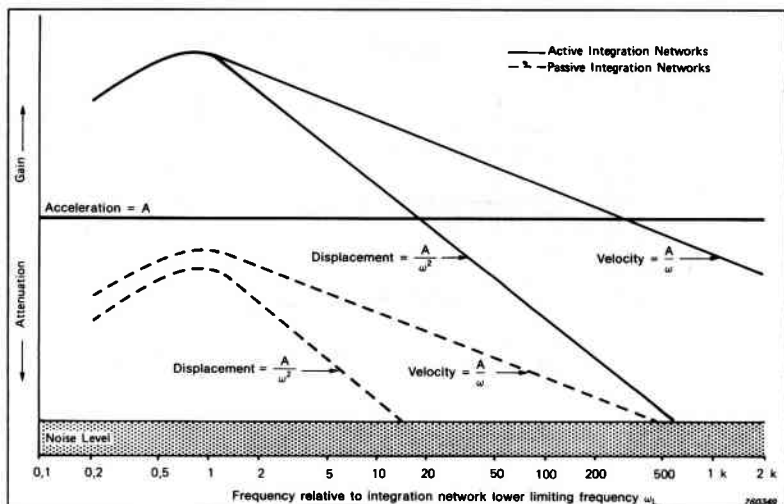


図3.28 電氣的積分器の周波数応答特性。

信号が積分回路に入る前に増幅すればこの回路による積分領域が広がる。こうすることによって積分回路のダイナミックレンジも改善される。そのような積分回路は“アクティブ”という言葉が付けられ、B&K社の積分オプションの付いたプリアンプにも組み込まれている。積分回路の代表的な応答を図3.28に示す。図中の曲線にピークのあることに注意。

過渡振動を測定した信号に積分回路を用いるときには注意が必要である。過渡信号に含まれている低周波数成分がこのピークにかかると、積分回路の警音(“ring”)が出て測定にひずみが生じる。図3.29は1msと10msの持続時間の正弦波状の過渡的な加速度の信号を電氣的に積分した例である。図では電氣的積分と本当の積分を比較している。低い周波数成分を含んだ持続時間の長い方の測定ではピーク値に誤差が発生している。

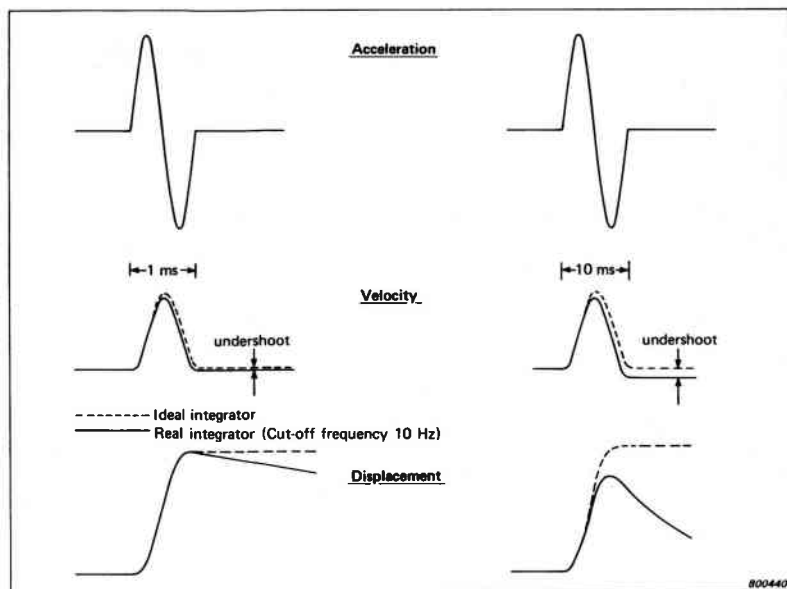


図3.29 2つの加速度パルスの電氣的積分と解析的積分の比較。

### 3.7.2 フィルタ

振動測定において取り扱い信号の周波数範囲を限定したい事がよくある。たとえば、歯車を含んだ回転機械の振動測定現象に関係のある周波数範囲よりも高い周波数域に非常に高いレベルの信号／ノイズが乗っていることがある。この高レベルの信号／ノイズがあると、プリアンプが過負荷で振り切れて、目的の周波数範囲にも歪波成分が混入する。これを防ぐにはプリアンプ以前でフィルタによって高周波数帯の高レベル信号を除外しなければならない。このようにフィルタを用いることによって、1.4節で述べたような計器の最適のダイナミックレンジを使用できる。

一方、過渡的な温度変化やベースの曲げなどから振動の信号に混入する低周波数成分ノイズはハイパスフィルタで除くことができる。しかし一般にこの問題はデルタシェア®型の加速度計では起こらない。

B&K社のいくつかのプリアンプにはローパスおよびハイパスのアクティブフィルタが組み込まれており、それらの-3 dB点はスイッチで選択できる。詳細については付録EおよびFを参照されたい。

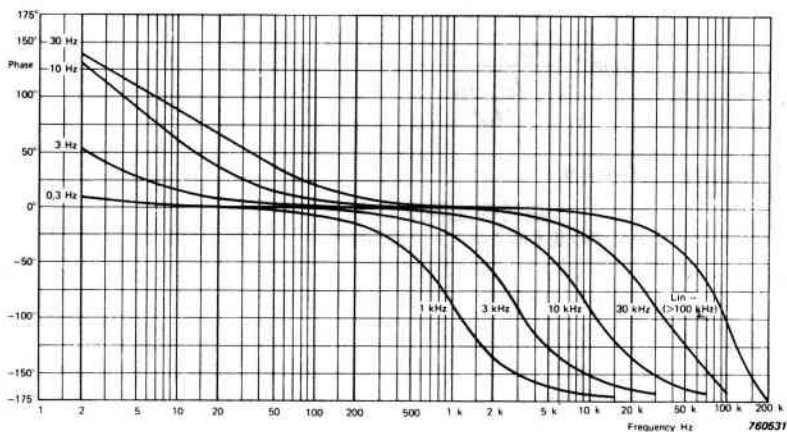


図3.30 フィルタ設定を変えた場合のB&K社チャージアンプの位相特性。

過渡現象の測定では位相を考慮しなければならないが周期的現象の測定ではフィルタの使用によって生じる位相の非線型性は信号のRMS値には無関係である。もし、測定している信号の周波数成分がわかっているならば、位相ひずみを最小にするような周波数範囲を選ぶことが出来る。チャージアンプの取り扱い説明書から引用した図3.30に似たグラフを利用すれば、この周波数範囲が決定できる。

メカニカルインピーダンスの測定や校正の時のように2個のチャージアンプを同時に使用する場合には、最大の位相差 $\Delta\phi$ は次の関係式から決定できる。

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

ここで $f_{c1}$ と $f_{c2}$ はそれぞれのプリアンプの下限周波数、 $f_{cn}$ は位相差を最大にする周波数、この関係式は6dB/オクターブ(20dB/ディケード)のフィルタを内蔵するプリアンプ用の式である。もしフィルタの勾配が12dB/オクターブ(40dB/ディケード)の場合は位相は2倍になり上の式は次のようになる。

$$\Delta\phi = 2\tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

### 3.7.3 過負荷インジケータ

B&K社のプリアンプの基本的でユニークな点はその過負荷警報機能である。これは入力プリアンプの出力レベルとフィルタの出力レベルと出力アンプの出力レベル(図3.25参照)をモニタすることによって測定ミスを避けるのに役立つ。こうすればフィルタによって過負荷の発生が分からなくなるのを防ぐことができる。過負荷状態は小さなランプで表示される。過負荷から20dBを示すランプも役に立つ機能である。警報ランプがちょうど点灯する程度に入力側と出力側のゲインを調節する。この状態がこの測定部分のダイナミックレンジが最適の状態である。

### 3.7.4 基準用発振器

これはシステムの較正やチェックにつかう。ポータブルテープレコーダを用いた現場測定では特にこの機能は役に立つ。振動測定時に基準信号をテープに記録することが出来れば、後で録音した信号の較正をするのに役立つ。これはまたレベルレコーダや測定用アンプを使用するとき信号のレベルを決めるのにも使える。

### 3.7.5 電源

B&K社のプリアンプの電力供給方法はいくつかある。これについては付録EやFの表に記載されている。

利用できるならば両極電源を使用するのが良い。それによって同相成分と電源ノイズを大きく抑制できる。これは大きな多チャンネルの振動測定装置にとって大切である。

バッテリー電源は測定器をポータブルにできると同時にシステムノイズを減らす。この性質は野外測定に有用である。

2805型電源は最大12個の両極電源を備えていると同時に12個の単極電源としても使える。

## 4. 加速度の実用上の性能

### 4.1 序

この章では正確な振動測定を行うための正しい加速度計の使用法の指針について述べる。図4.1は振動測定中に発生する多くの外乱信号の発生要因を示している。デルタシェア型加速度計は、これらのすべての外乱信号の影響が最小になるように設計されている。

それには二つの一般的な条件が考えられる。

1. 環境 環境の影響を全く受けない振動測定用センサなどは存在しない。しかしながら、このデルタシェア型加速度計は過酷な条件に於ても優れた性能を示し、環境の影響に対する感度は非常に小さく、限度されている。

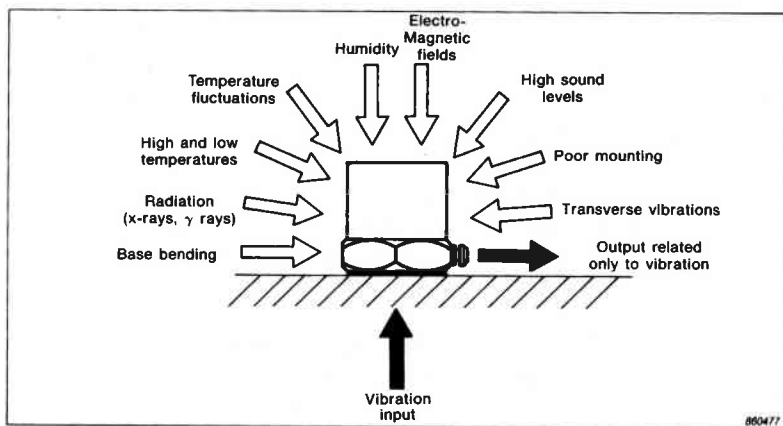


図4.1 振動変換器の設計が良くない場合に、振動に無関係の出力の発生する外的要因。

2. 固定方法 固定方法によっては周波数応答やダイナミックレンジが変る。さらに、加速度計の固定位置や加速度計の質量も考慮しなければならない。そこで、最適な性能を発揮させるために、この章で詳しく述べられている指針に従わなければならない。

## 4.2 環境の影響

振動測定は加速度計に特別な影響を与える環境で測定しなければならないことがしばしばある。信頼できる測定値を得るために、すべての環境の影響を抑制できるセンサを設計することが重要である。このようにして、多数の加速度計が設計されてきた。

しかし、環境の影響を抑制したデルタシェア型に匹敵するものは他にない。過酷な環境下でもその影響は小さく保たれており、たとえば、非常に高い温度や、強磁場などの影響は計算できるし、測定された振動レベルへの寄与分も評価できる。B&K社の加速度計には環境の影響に対する感度についての非常に包括的な仕様書が用意されている。これらの影響の測定方法については、国際規格、特にISO 5347 “Methods for Calibration of Shock and Vibration Pickups” や、アメリカ規格ANSI Z39.1-1969, “The Selection of Calibrations and Tests Electrical Transducers Used for Measuring Shock and Vibration”などに、述べられている。

### 4.2.1 使用温度範囲

圧電型加速度計は幅広い温度範囲内で振動測定が可能である。しかしながら、説明書に示された温度範囲以外で加速度計が使用された時には、圧電材料の特性のためにインピーダンスはもちろん、電圧感度や、チャージ感度も変化するであろう。

たとえば、図4.2は最近のすべてのB&K社の加速度計で使用されている圧電材料PZ23の電気容量、チャージ感度、電圧感度の変化を示している。加速度計に添付されている校正チャートにはその加速度計に使用されている圧電材料に関する性質の含まれている。これらの感度の変化は定まったもので、校正時の温度に戻れば永久変化は残らない。高温で加速度計を使用する場合には、温度上昇による感度の変化をチャートから求め、実際の感度が決定できる。



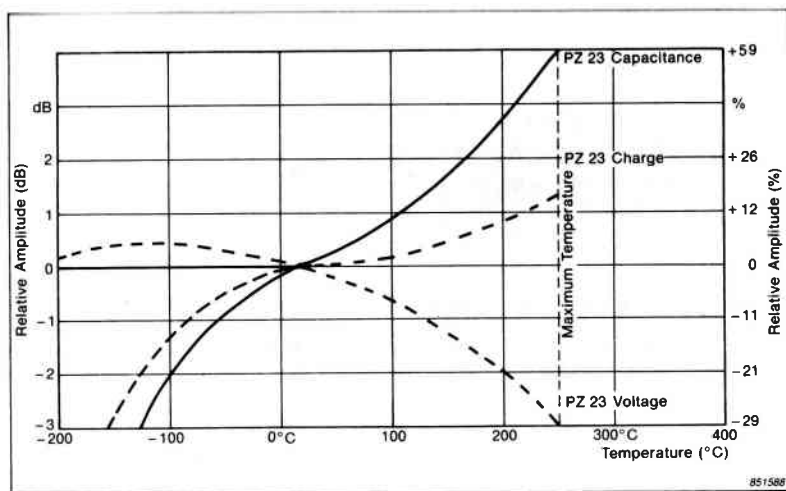


図4.2 圧電素子PZ23の電気容量、チャージ感度、電圧感度の温度依存性。

感度が校正図に示されている値に戻るのに要する時間は加速度計が用いられているときの温度に関係があり、決定するのは難しい。周囲の温度がゆっくりと変化する場合には、加速度計の感度は図4.2に示されている曲線をたどるのであろう。しかしながら、圧電材料に急激な温度変化が加わる場合はヒステリシスの影響が現れ、加速度計が校正図に示されている感度にまで安定するのに幾分時間がかかる。一般的には加速度計の最高使用温度から室温まで変化する場合、加速度計が校正された感度に戻るまでに24時間は要する。

各加速度計はその圧電材料が消極し始め、感度が変化する特定の最高使用温度がある。圧電材料PZ23が使用されている加速度計では250°Cである。使用限度温度50°C越える範囲では徐々に感度が消失する。それ以上では急激な消極が起り加速度計は壊れてしまう。

250°C以上の高温では8310型工業用加速度計が用いられる。これは400°C以上まで使用できるよう製作されている。図4.3に示されるように、熱伝導性の高い金属で作られたスクリーンを用いて汎用の加速度計の底面を振動面から熱的に絶縁することができる。これは

加速度計からの放熱速度を促進する。このようなスクリーンの使用により350℃位の表面温度上の測定が可能になる。もし、加速度計に直接冷却用空気が吹き付けられるならば、450℃位の表面温度まで測定可能となる。しかし、加速度計の固定点の剛性はそのような固定具によって変化し、加速度計の共振周波数が低下するので、有効周波数範囲が狭くなる。加速度計に接続する計測装置は一般に常温でしか用いられないので、加速度計より少し離れた位置に設置すべきである。

多くのB&K社の加速度計の最低温度限界は-74℃である。仕様書でこの温度以下で性能は表示されていないが、実際には汎用の加速度計でももっと低い温度で使用可能である。たとえば汎用の加速度計を用いて、液体窒素温度(-96℃)で構造物の振動を測定した例がある。

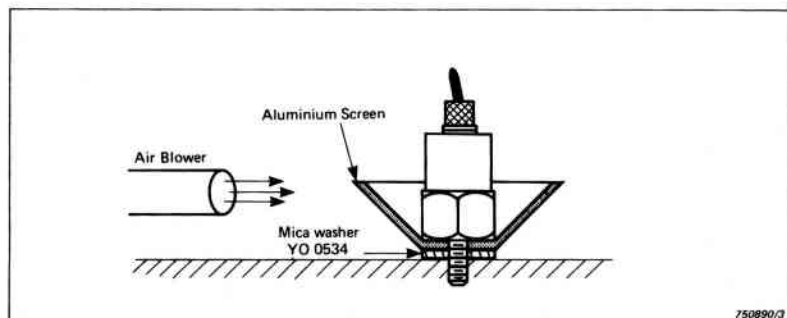


図4.3 熱い表面上へ加速度計を固定する場合のアルミニウム製の放熱スクリーンの使用。

#### 4.2.2 温度の過渡的变化の影響

振動測定中の周囲温度の非常に速い変動（例えば、通風や熱流などによる）によって加速度計の出力に低周波数の雑音信号が現れることがある。

##### 1. パイロ電気（焦電気）効果

圧電結晶体や強誘電体や強誘電線セラミックなどが温度の不均一な変化によって帯電する現象である。人工的に分極したセラミックではこの帯電は分極方向に垂直な面上に形成される。そこで、圧電素子を圧縮型に用いた加速度計では振動により誘起される電荷は分

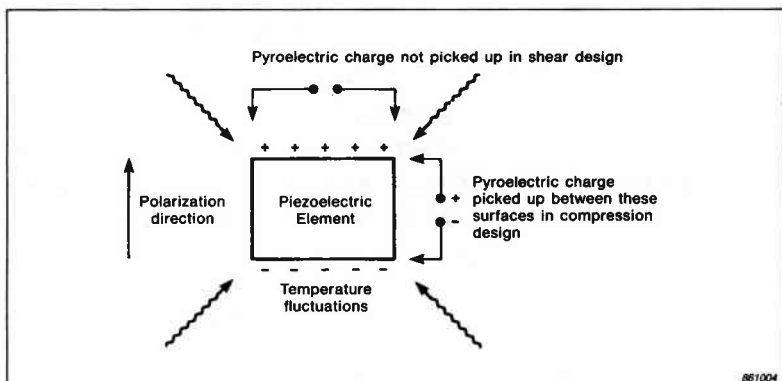


図4.4 圧縮型に比べてせん断型では圧電材料の温度変化の影響を受けない。図中の電荷は焦電効果によるもので、振動には関係がない。

極方向に垂直な面に現れるので、同方向に現れる焦電効果による電荷は、誤差となる。しかし、せん断型に設計されたものでは、分極方向に平行な面の電荷を取り出すので、この外乱による信号は現れない。これらのことを図4.4に示す。

その結果、せん断型のは理論上温度変化には無感である。実際、圧縮型のものより温度変化に対する感度は約1/100位である。B&K社では圧電素子を充分に選択しているので、この影響は最小になっている。

## 2. 不均一な熱膨張

加速度計の一部分の膨張や加速度計のケースへの不均一な熱流があった時に起こる。これらの現象は圧電素子に力を加えることになり、その結果、信号が出てくる。圧縮型のはせん断型のものよりこれらの影響を受け易い。

これらの影響は低いレベルの、低周波数の振動測定を行う時に顕著に現れる。建物や橋梁、船舶などの大きな建造物の戸外での測定の場合には一方向の風による急激な冷却効果が現れるので、これらの影響を小さくした加速度計を用いることが必要である。工場でも温度変化は見られるが、振動レベルの高い場合が多いので、その影響はあまり大きくはない。

各加速度計に添付されている校正表には代表的な過渡温度感度が示されている。次に述べるような方法によって、温度変動による低周波数雑音は低減あるいはほとんど除去することができる。

## 1. 正しい選択

温度変動の影響を減少させる多くの因子の中で最も重要なものは加速度計の選択を正しく行うことである。デルタシェア<sup>®</sup>型は圧縮型に比べて優れている。

## 2. ハイパスフィルタ

もし、圧縮型を用いた時には偽の低周波数の信号を除去するハイパスフィルタを使用する必要がある。そのようなフィルタはB&K社の振動測定用のプリアンプのほとんどのものに組み込まれている。下限遮断周波数は0.3~30Hzの間で選択することができる。温度変化のあるところでは圧縮型の加速度計を使用するときは3Hz以上の下限遮断周波数が必要である。2644型のラインドライブアンプや、4390、8317、8318型などのプリアンプ組み込みの加速度計ではこれらの影響が最小になるような下限遮断周波数にあらかじめ設定されている。個々のプリアンプやプリアンプ組み込み加速度計の詳細は製品に添付のデータシートに記載されている。

## 3. 遮蔽 (シールド)

場合によっては加速度計の周囲にスクリーンや軽い熱の絶縁体を取り付けることにより可能となる。マイクロフォンの風防はこの目的に適している。あるいは発泡ポリスチレンも使える。

### 4.2.3 音の影響

ほとんどの振動は音を伴い、振動の測定は高い音圧レベルのある雰囲気ではしばしば行われる。B&K社のデルタシェア<sup>®</sup>型加速度計は高い音圧レベル(SPL)でも振動測定できるように剛性が高く、音の伝わらない構造になっている。デルタシェア<sup>®</sup>型加速度計の音圧感度は2~100Hzの範囲で、154dBのSPLに対して $0.0001\sim 0.004\text{ms}^{-2}$ である<sup>1)</sup>。他の構造のものではおそらくこれより高い感度となる。旧式の圧縮型のはケースと圧電素子の間が機械的に独立していないので、測定対象が音によって振動するような場合、この問題は十分検討する必要がある。

脚注：音圧感度はこの範囲で測定されているが、これ以上の周波数でも多分一定であろう。

#### 4.2.4 基部のひずみの影響

これは“基部(Base)の曲げ”という言葉から容易に理解できるように、振動している構造物上に加速度計を設置したとき、基部は曲げ応力を受け、そのために発生する為の信号が測定される。この信号の周波数は振動周波数と常に同一である。一般に、大きい変位や歪は低い周波数であるので、低周波数域でこの影響は顕著である。

振動試験装置用のフィードバック回路に使用される加速度計は特に基部ひずみ感度の低いものが要求される。フィードバック信号を出す加速度計は大きい基部ひずみを受けることがあるので、ひずみ感度が大きいと加振器への励起信号が歪められる。

B&K社製加速度計はデルタシェア® 型の設計により、これらの影響は小さくなっている。この設計では圧電素子は基部のすべての変形から十分に絶縁されている。この影響を小さくするために圧縮型に用いられているような極端に分厚くした重い基部を用いる必要がない。

B&K社製8305型参照用加速度計は圧縮型であり、基部の曲げによる影響から圧電素子を絶縁するためにベリリウムの円盤を利用している。較正時の整った条件下では、この加速度計の基部ひずみは問題にしないでよい。

汎用のデルタシェア® 型加速度計の代表的な基部のひずみ感度は $250 \mu \epsilon$ の基部のひずみに対し $0.02 \text{ms}^{-2} / \mu \epsilon$ であり、各形式の代表値は各加速度計に添付されている較正表に記載されている。

#### 4.2.5 湿度の影響

すべてのB&K社製の加速度計は溶接かエポキシ樹脂で密封した構造となっており、湿度の影響を効果的に防いでいる。濡れたり、極端に湿った雰囲気中で使用するとき、加速度計のケーブルとねじ込みコネクタを完全に密封することが大切である。さもないと、漏洩抵抗が減少し、低周波の応答が低下する。Dow Corning RTV 738、3 M Scotch Clad Strip Coating 2253や同種のコンパウンドなどの密封剤を使用すれば密封できる。

B&K社製加速度計のケーブル・スリーブは一般湿気を通過させないPTFEやPFA(テフロン)でつくられ、液体中に完全に浸漬することができる。

#### 4.2.6 磁界の影響

B&K社製加速度計は磁場に対しては全く感じない。最大感度の方向に沿って磁力線のあるときが最悪の場合で、その感度は $0.5 \sim 30 \text{ms}^{-2}/\text{Tesla}$  ( $0.005 \sim 0.3 \text{g/kガウス}$ )である。

#### 4.2.7 放射線の影響

プリアンプ付きを除いて、すべてのB&K社の加速度計は $20 \text{kGy}$  ( $1 \text{Gy} = 100 \text{rad}$ )以上のガンマ線の条件下 ( $100 \text{Gy/h}$ ,  $6 \text{MeV}$ )で使用することができる。このように放射線に曝されると100%以上の感度変化がある。

普通の加速度計用ケーブルを使用してもよいが、 $1 \text{kGy}$ 以上の時には特殊なケーブルを使用するのが望ましい。8310型工業用加速度計はこのような環境下で感度変化は3%以下であり、非常に強い放射線環境下で使用できる。 $1 \text{MGy}$ 、 $10^{18}$ 中性/cm<sup>2</sup> ( $10 \text{kGy/h}$ ,  $1 \sim 5 \text{MeV}$ 、1秒間に1cm<sup>2</sup>当り $10^{12}$ 中性子の熱中性子線束)の累積被爆で約5%の感度変化が現れる。更に詳細なことについては、工業用加速度計についての製品データを調べられたい。

#### 4.3 加速度計の質量付加効果

加速度計を振動物体上に設置したとき、全体の質量は増加し、局部的な剛性の変化を伴い、構造物の動的性質の変化は避けられない。

加速度計の取り付けによるメカニカル・インピーダンスの増分がもとのメカニカル・インピーダンスと同程度のときには、この変化は無視できない。加速度計によって構造物に付加されるメカニカル・インピーダンス $Z_a$ は加速度計の質量 $m_a$ を用いて

$$Z_a = \omega m_a$$

これは取り付け共振周波数の0.9倍までの周波数で有効である。加速度計の取り付け位置付近の加速度計は上記の周波数の範囲内で、次式で表されるように変わる。

$$a_m = a_s \frac{Z_s}{Z_s + Z_a} \approx a_s \frac{m_s}{m_s + m_a}$$

ここで、

$a_m$  = 加速度計で測定された加速度

$a_s$  = 加速度計のないときの測定点の加速度

$Z_s$  = 付加する前のメカニカル・インピーダンス

$m_s$  = 構造物の質量で、多くの場合、メカニカル・インピーダンスは主に加速度計付近の構造物の質量である。

この関係より構造物の共振周波数は次式のように減少する。

$$f_m = f_s \sqrt{\frac{m_s}{m_s + m_a}}$$

ここで、

$f_m$  = 加速度計の質量のある場合の構造物の共振周波数

$f_s$  = 加速度計のない場合の構造物の共振周波数

これらの式は加速度計の質量すなわちメカニカル・インピーダンスが構造物の質量と比較して小さければ、振動の変化は小さいことを表している。一般的に言って加速度計の質量が構造物の質量の1/10より小さければ問題はない。

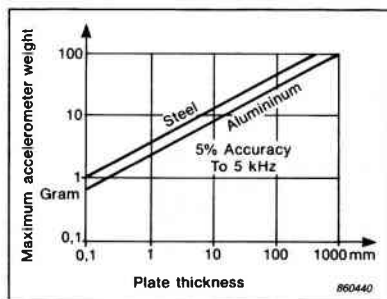


図4.5 薄いアルミニウムと鉄板の振動における加速度計の質量とチャージの間の理論的關係。

図4.5は特定の周波数範囲での加速度レベルの変化に対する加速度計の質量と板厚の関係を実験的に解析した結果を示す。これは軽いAl板や鉄板の振動測定に利用できる。

#### 4.4 加速度計の固定法

振動を正確に測定するためには次のようなことを保証しなければならない。

1. 有効な周波数範囲やダイナミックレンジが加速度計の固定方法で制限されない。
2. 加速度計の質量によっては試験対象物の振動特性が変化しない。
3. 測定点は測定値の再現性のために正確に同じ位置に設置する。

正しい固定法の選択はこれらの基準に影響することが明らかである。加速度計の有効な周波数帯域は各加速度計に添付されている較正表に記載された共振周波数によって決定されることはすでに述べた。取り付け共振周波数は、180grの鋼製ブロックの表面を図4.6の規準に従って仕上げ、標準の取り付けネジを用いた最適の固定条件で測定されている。

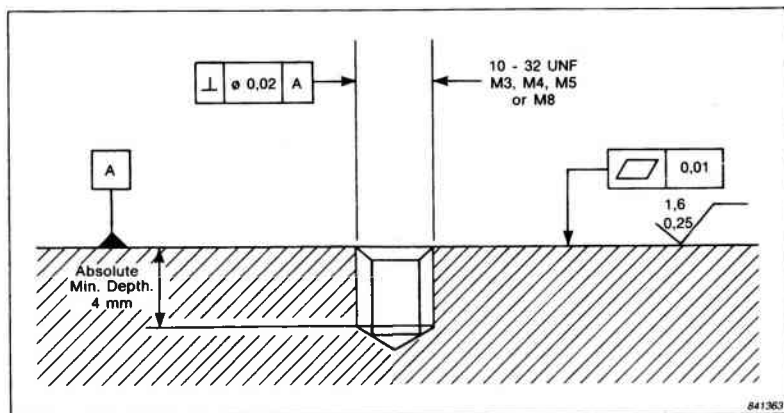


図4.6 固定表面と固定用ネジ孔の推奨公差。ISO 1101による寸法とシンボル。



#### 4.4.1 振動測定物の表面の仕上げ条件

取り付け共振周波数を高くするには試験片の表面を可能なかぎりきれいで滑らかにする必要がある。可能ならば図4.6の指示通りに仕上げるべきである。また、加速度計の固定用ネジ穴も図4.6に示したようにネジ加工する必要がある。グリースなどの油脂類はアセトンのような市販の溶剤で除去する。

#### 4.4.2 取付場所

多くの場合加速度計の設置位置は振動測定の目的から、はっきり指定される。また、加速度計は測定方向にその主感度軸を合わせて取り付けなければならない。

しかし、加速度計はすでに述べたように主方向以外の方向の振動にも反応する。B&K社製加速度計は赤印を横方向振動の最大の方向に向けることで、その影響を最小にすることができる。

ガスケットのようなコンプライアンスやダンピング要素を避け、振動源への短い、剛性の高い振動伝達経路の位置を選ぶ。たとえば、回転機械の振動を測定する時は軸受箱上は加速度計を設置するのに適している。

加速度計を設置した方向よりほかの方向の振動からも価値のある情報が得られることがしばしばある。三軸の加速度計を使用すれば同一地点で互いに垂直な三軸方向の振動のデータを同時に得ることが出来る。

多くの構造物の動的レスポンスは複雑なことが多く、設置位置のちよつとした違いで測定値が大きく変化する。これは特に高周波数の振動で著しい。一般則として、振動の節点で測定すべきでない。構造物の節や節でない所を見分けることは、4.4.9節に述べたような手持ちのプロープを使って、迅速試験法によって構造物全体を調べるとよい。

多分、振動測定の最も難しい分野の一つは人体にかかわる振動分野である。たとえば体全体や手一腕系の振動に関するものである。これらの測定では変換器の形式、周波数範囲、ダイナミックレンジ、固定法、固定位置などについて特別に考慮する必要がある。

#### 4.4.3 固定法による加速度計の周波数応答の変化

次節以降では加速度計の固定法の周波数域への影響、ダイナミックレンジなどへの影響を現在用いられている種々の取り付け方法について述べている。周波数応答は180gの振動台に加速度計を取り付け、これを永久磁石によって振動して測定する。振動台の加速度はフィードバック回路を用いて広い周波数帯域にわたり一定に保たれている。

比較を簡単にするため、すべての測定は同じ汎用加速度計について行っている。この節で述べている種々の固定法により得られた周波数応答の最も重要な比較点を図4.7に示す。

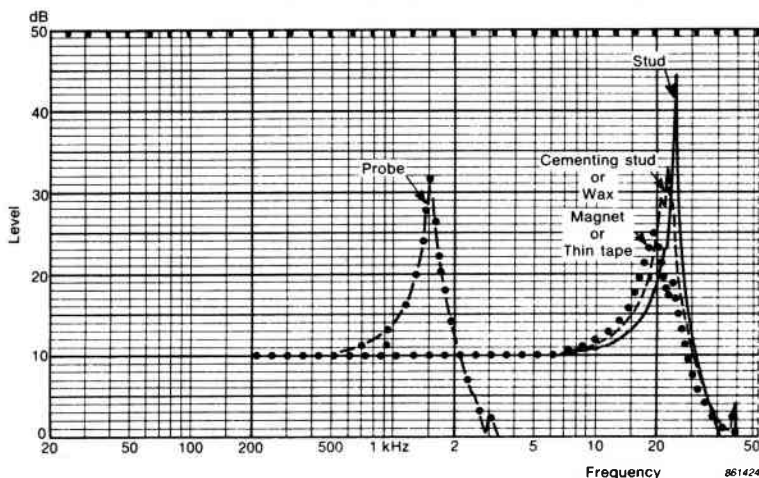


図4.7 幾種類かの加速度計の固定法に対する周波数応答の曲線の比較。

#### 4.4.4 ネジによる固定法

取り付け方法：

1. 前もって試験物の表面を図4.6に示すような公差内に加工する。また、加速度計取り付け面は可能な限り清潔かつ平滑にする。
2. ドリルとタップで試験物上に必要な大きさの固定用ネジ穴を加工する。このネジ孔は加速度計用ネジに合った十分な深さがなければならない。小さい加速度計ではM3のネジ用タップQA0041型を用い、8mm(0.25in)の長さの鋼製ネジ YQ2007型を用いる。

汎用の加速度計ではQA0029型のタップを、12mmか8mm(0.5か0.312in)の長さの10~32UNFネジYQ2960型かYQ2963型を用いる。8318型加速度計ではM8のタップQA0141型とネジYQ9335型を用いる。

3. ネジ孔にネジを挿え込み、加速度計をねじ込む。ネジが加速度計の孔の底につかないように注意し、スパナを用いて加速度計を締め付け、締め付け過ぎないように注意しなければならない。図4.8参照。

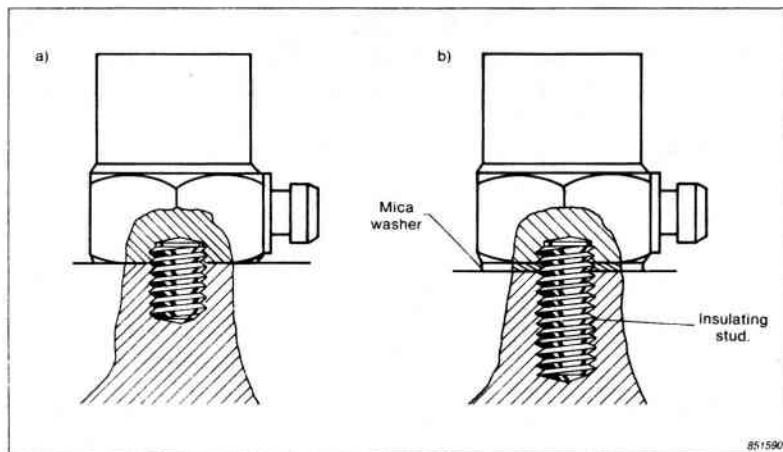


図4.8 ネジによる加速度計の取り付け。右側は絶縁ネジとマイカのワッシャを使用しての固定法。

#### 用途：

1. 高い周波数の振動測定には出来るだけ高い共振周波数を必要とする。
2. 永久に振動を監視するときに用いる。

#### 利点：

1. 加速度計の最高の性能となる。可能ならばこの方法が最も良い。
2. 加速度計の固定法による温度範囲の制限がない。
3. 非常に高い振動レベルで使用できる。

## 欠点：

1. 被測定物の表面を加工し、ドリルとタップでネジ孔加工をしなければならない。

## 注意：

1. 薄いシリコングリースの層を加速度計と試験面の間につけると表面が完全に滑らかでない場合でも高い周波数での性能が向上する。
2. ネジで加速度計を固定するときの推奨トルクは普通のネジ10-32UNFでは1.8Nm小さいM3ネジでは0.60Nmである。指による締め付けで不十分(~0.3Nm)のように見えるが、加速度計の周波数応答は手で強く締め付けたものとほとんど変わらない。スパナを用いて加速度計を強固に締め付ける必要があるのは、高い周波数を測定するときだけである。図4.9参照
3. スパナを使用する時はネジが破損したり、加速度計のネジ孔をつぶしたりしないように過大なトルクとならないよう注意しなければならない。万一、締め過ぎるとネジを加速度計や試験表面から取りはずすのが困難になり、場合によっては加速度計が壊れる。
4. ネジは加速度計のネジ部の底に当たってはならない。また、加速度計のベースが振動面に密着していなければ大きな誤差が起きる。

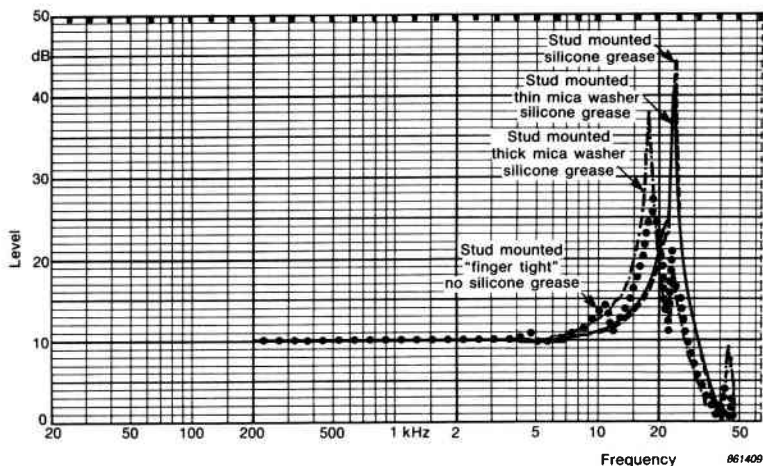


図4.9 ネジ固定をした汎用加速度計の固定法のわずかな相違による周波数応答の変化。

5. 大きい機械の多点測定の際には特にグラウンドループの問題がもちあがるので、しばしば試験面から加速度計を電気的に絶縁する必要がある。これはベースが絶縁された加速度計や、マイカのワッシャYO0534型またはYO0746型と絶縁用ネジYP0150型を用いて行われる。マイカのワッシャを使用するときは80℃以上の温度になるとネジにクリーブが起り、取り付け共振周波数が低下する。出来るだけ薄いマイカ板を用いることにより、良好な機械的結合が得られる。
6. 4374型小型加速度計はネジ固定式でないので、他の方法を用いなければならない。
7. 8309型衝撃用加速度計はM5のネジ付きである。
8. 工業用加速度計はネジで固定される。

#### 4.4.5 ワックスによる固定法

##### 取り付け方法：

1. 固定面をできるだけ滑らかに、また、加速度計のベースの汚れやグリースを取り除かなければならない。
2. 加速度計とセットで供給されるワックスYJ0216型の少量を削り取り、指で柔らかく縛る。
3. 試験面上にワックスを加速度計のベースの面積より大きく塗り付ける。層は二面間の隙間を満たす程度の厚さとするべきである。
4. ワックス上を加速度計を滑らせ、押さえつけながら、加速度計を回し、表面上に接着する。これは図4.10に示すように少し練習を要する。

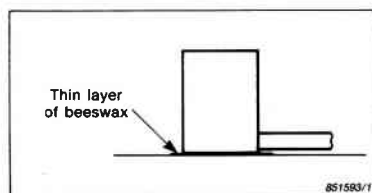


図4.10 ワックスによる小型加速度計の固定。

### 用途：

1. 簡単に試験測定を行う時。
2. ネジ取り付け用のネジ穴があけられないとか、あけない方が望ましい場合。
3. ベースにネジ穴のない加速度計の取り付け。

### 利点：

1. 迅速かつ簡便な固定法である。
2. 固定したものの共振周波数はネジによる固定法より少し低くなるだけである。

### 欠点：

1. 使用温度限界は40℃である。
2. 測定可能な最大振動のレベルは約 $100\text{ms}^{-2}$ である。

### 注意：

1. ワックスは軟化するので温度特性は悪い。ワックスが軟化すると、結合剛性は減少し、取り付け共振周波数は低下する。さらに進むと測定面から離れる。
2. ワックスの使用が多すぎると取り付け共振周波数が低下し、図4.11に示すように測定可能周波数範囲を狭める。

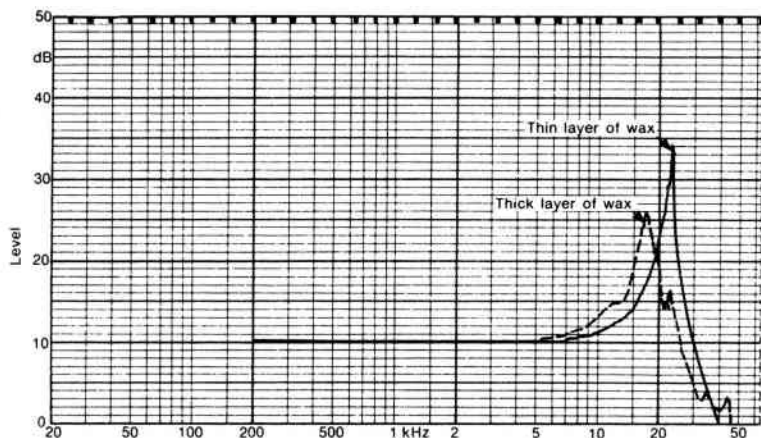


図4.11 ワックス固定法による汎用加速度計の周波数応答。

861408

#### 4.4.6 磁石による固定法

##### 取り付け方法：

1. 試験物や加速度計の表面上にグリースがないようにする。
2. 永久磁石UA0642型の上に加速度計をネジ込み、必要ならば、スパナで締め付ける。小型の加速度計用の小さい磁石もある。図4.12に示すように構造物に加速度計を設置する前に加速度計と磁石の間や構造物と磁石の間にシリコングリースの薄い膜を塗ることによって高周波応答が改善される。

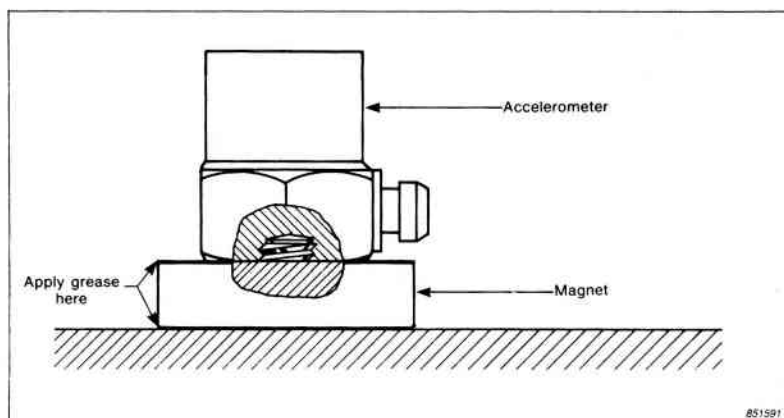


図4.12 加速度計固定用磁石 UA 0642型の使用。

##### 用途：

1. この方法の迅速性は、たとえば、生産機械の恒久的な測定位置の決定などの予備的な測定に対して理想的である。

##### 利点：

1. 非常に迅速な方法である。
2. 取り付け剛性が低いように見えるがそれほど悪くない。特に平らな面では高周波数域の性能は良い。図4.13参照。
3. 高加速度までの使用ができる。

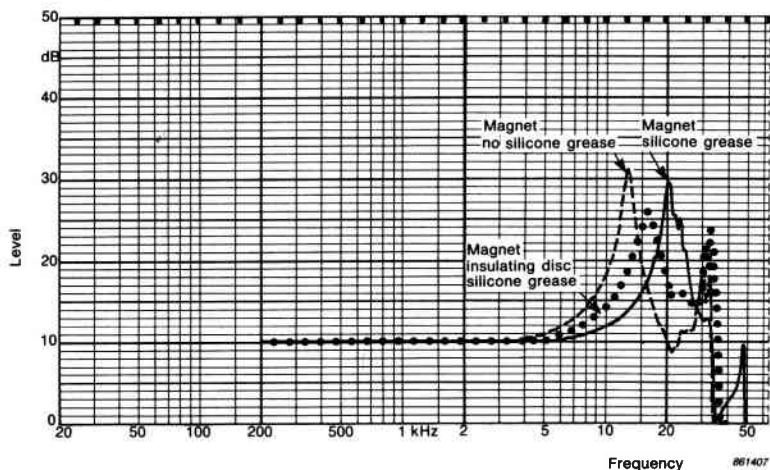


図4.13 磁石で固定した汎用加速度計の周波数応答。

欠点：

1. 試験物の表面は磁性体でなければならない。そうでないときは磁性体の円盤か、板を表面に接着（またはネジ付け）する。
2. 確実に同一点に取り付けることは保証されない。
3. 磁石の追加による構造物への余分な質量の負荷効果がある。これはパネルや板のような軽い構造物の測定を行うときは重大な欠点となる。磁石UA0642型の重さは16gである。

注意：

1. 試験物から加速度計を電氣的に絶縁することもできる。これには固定用磁石UA0643型と5枚セットになって供給されている接着剤付き円板PTFEを使用する。円板は試験体の表面と磁石の間に置く。
2. パイプのような曲面でも測定は可能であるが、周波数帯は曲面の半径が減少する程狭くなる。
3. 磁石の最大保持力は表面の状態や絶縁板の使用により35~60Nである。従って最大の振動レベルは加速度計と磁石の総重量により変化する。種々の形式に対してその値はB&K社製加速度計の製品データに記入されている。例えば、加速度計17gのものは $1.2\text{kms}^{-2}$ の加速度計レベルまで使用できるが、175gのものでは $0.2\text{kms}^{-2}$ までしか使用できない。



#### 4.4.7 接着ディスクによる固定法

取り付け方法：

1. 振動測定面と加速度計を脱脂する。
2. ディスクの保護膜をはがしディスクを図4.14のように加速度計にしっかりとくっつける。
3. 加速度計を振動面に接着する。

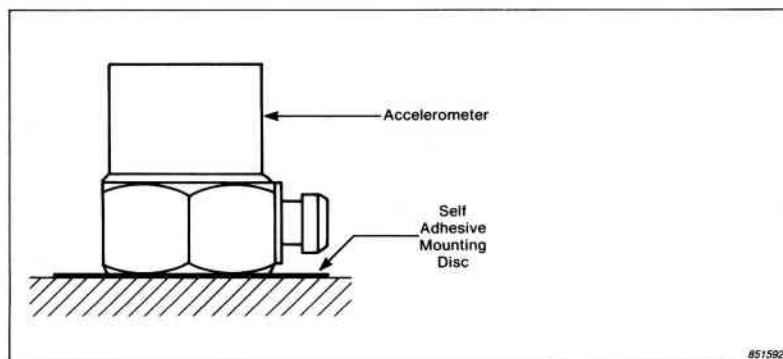


図4.14 接着ディスクによる加速度計の取り付け。

用途：

1. 試験的な振動測定を手早く行う。
2. ネジ用の穴あけが出来ないか、好ましくない所での測定。
3. ベースにネジ孔のない加速度計の固定。

利点：

1. 比較的高い周波数範囲で高い加速度までの測定が可能。
2. 電気的に絶縁ができる。

欠点：

1. 高・低温での使用に限界がある。

注意：

- 1 両面接着型ディスクは直径40mmディスク (DU0079型)と5.5mmディスク (Y00073型)が利用できる。小さい方は25枚のセットで、小型の加速度計に使用される。大きい方は一個単位で供給されており、どの角度で取り付けるにも十分な接着力があり、比較的高い周波数特性が得られる。図4.15参照。しかしながら、これらの方法で得られる特性は最も確実なネジ固定法に準ずるものにすぎないことを忘れてならない。
2. 両面接着テープも用いることができ、テープが薄ければ、よい結果が得られる。しかし、テープが厚くなければ、高い周波数での性能が低下する。

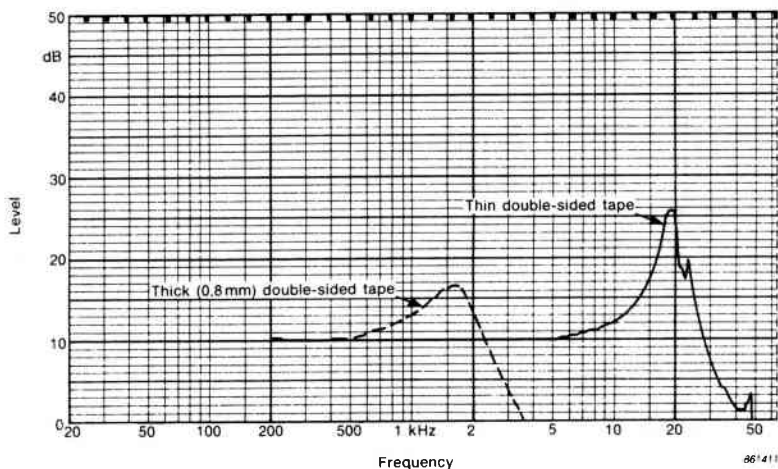


図4.15 接着ディスクで固定した汎用加速度計の周波数応答。

#### 4.4.8 接着法

加速度計を設置するのに接着剤を使用するには、二つの方法がある。

## 直接接着法

### 方法：

1. 表面を出来るだけ滑らかにし、汚れを取る。
2. 図4.16に示すように、シアノアクリレート系の瞬間接着剤を使用して、接着剤の説明書に従って試験表面に加速度計を固定する。

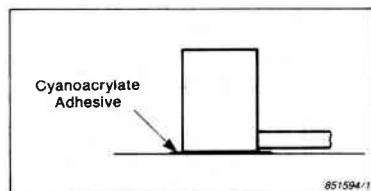


図4.16 シアノアクリレートによる小型加速度計の固定。

### 用途：

1. この方法は通常小さい加速度計によく用いられる。
2. 恒久的な振動測定のためにネジ固定法が使用できない所で用いる。

### 利点：

1. 高周波領域特性に優れ高加速度レベルで使用できる。

### 欠点：

1. 試験物表面から加速度計を取りはずすのに手間がかかり、とりはずした後も適当な溶剤で取り外した加速度計を清浄にする必要があり、少し時間がかかる。
2. 正確に同じ位置に設置することは難しい。
3. 電氣的絶縁は難しい。

## 接着式ネジ固定法

### 方法：

1. グリースなどの着いていない滑らかな設置面を確保する。
2. 適当な接着式ネジを選び、エポキシ系接着剤で試験物表面に接着する。使用した樹脂によるが接着剤が固まるには約30分要する。アラルダイトが適している。
3. 図4.17に示すように、指で加速度計をネジ込む。スパナを使う場合は十分注意して用いなければならない。

#### 用途：

1. 加速度計を移動させて複数の点で振動測定を行う場合に、ネジ穴が使えず測定点の再現性が必要な場合に適している。

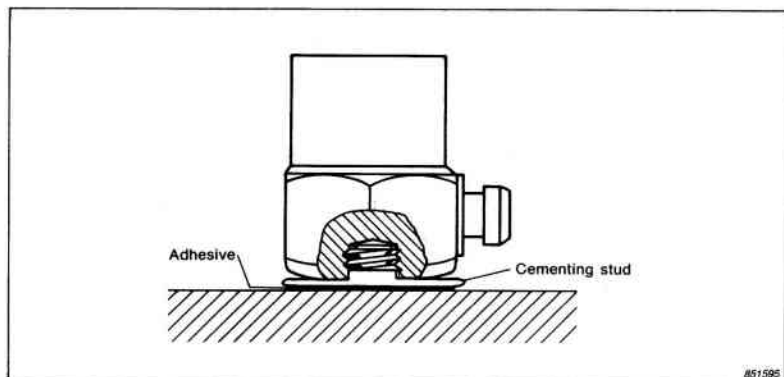


図4.17 接着ネジによる加速度計の固定。

#### 利点：

1. あらゆる測定性能がよい。

#### 欠点：

1. エポキシ樹脂を使えば接着に時間がかかる。
2. 試験面から接着ネジと凝固した接着剤を取り除くことは困難である。
3. そのままでは電氣的絶縁は難しい。しかし、接着ネジの下にガラス・ファイバを2枚敷くことにより、絶縁ができる。あるいは接着ネジにエポキシを薄く塗り、それが凝固してから表面に接着するのも良い。
4. 接着剤の種類にもよるが、一般に使用温度は80℃までである。3 MのCyanotite HG303のような高温用接着剤では200℃まで使用できる。

注意：

1. シアノアクリレートは非常に滑らかな表面でしか使用できない。粗い面や加工面に突起物があれば接着面に気泡が溜り、この種の接着剤の接着効果を減少させる。
2. シアノアクリレート程急速に接着できないが、エポキシ樹脂は表面に直接加速度計を接着することが出来る。
3. “軟い”接着剤は結合剛性を低下させ、図4.18に示すように、周波数範囲も著しく狭くなるので推奨できない。また、軟い接着剤は高温での性能も劣る。
4. 適当なメチルシアノアクリレート接着剤は3 M のCyanolite 101と PermaBond 747で、B&K社の商品番号はQS0007型である。これらは $-50^{\circ}\text{C}$ から $80^{\circ}\text{C}$ の温度で使用できる。他のものとしてはイーストマン (Kodak) 910 MHTとLocite ISがある。
5. 接着したネジに加速度計をしっかりと固定するために、スパナを使うならば細心の注意が必要である。加速度計を取り除くときには、最初にネジをゆるめる。加速度計を付けたまま試験面からネジ部を取り除くと、加速度計の基部にしっかりと締め付けられたネジ部をゆるめることは非常に困難である。

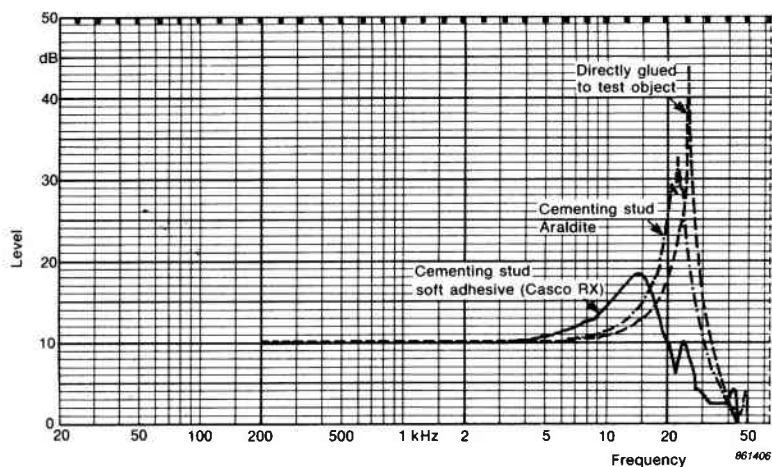


図4.18 接着剤により固定した汎用加速度計の周波数応答。

6. 接着型ネジは3つのタイプがある。直径14mm DB0756型と直径25mm DB2790型があり、どちらもB&K社製の加速度計の大部分のものに適用できる10~32 UNFネジである。前者は品番UA0866型として25個のセットで入手できる。また、直径8mmのものはM3のネジのものがある (DB0757型)。これは25個のセット (UA0867型)として入手できる。

#### 4.4.9 プローブ\*

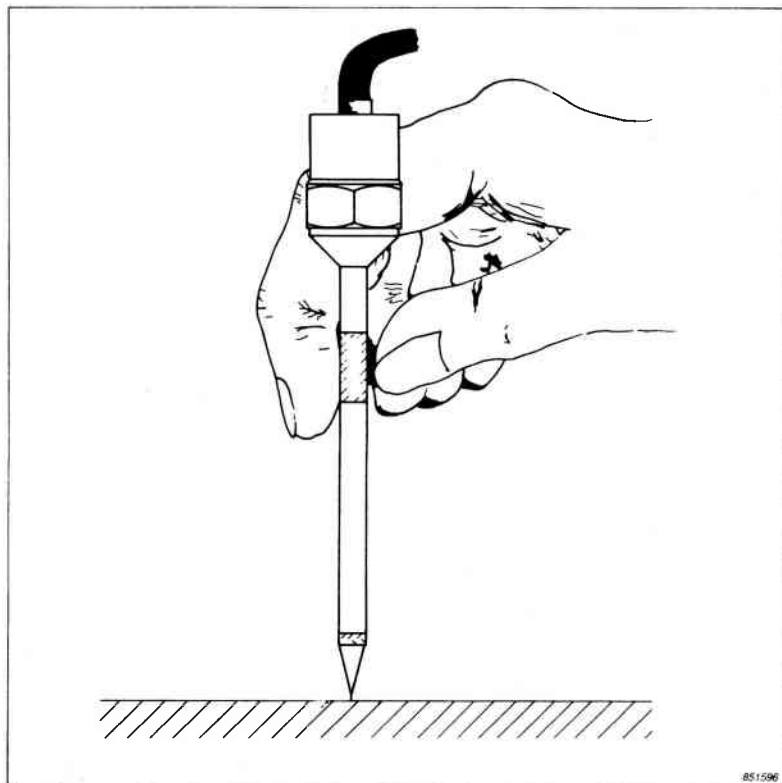


図4.19 迅速振動測定用のハンド・プローブ YP 0080型の使用。

\*この方法の制限はプローブで測定する場合、常に考えなければならない。

#### 方法：

1. 図4.19に示すように、10-32UNFネジ付きの手持ちプローブYP0080型に加速度計を付ける。
2. 少量のシリコングリースをプローブの先端に付け、プローブの軸が試験面に直角になるように保ち、滑らないようにしながら、プローブの先端を試験面に押し付ける。

#### 用途：

1. 点測定を迅速に行うための方法で、周波数範囲は1000Hz以下である。

#### 利点：

1. 最も迅速な測定方法である。

#### 欠点：

1. プローブ取り付け状態の共振周波数は多くの振動測定対象の周波数範囲内まで低下するので、場合によっては測定の意味がなくなることもある。図4.20に示すように、これらのプローブを用いるときはローパスフィルタの使用を推奨している。
2. 再現性は非常に悪い。

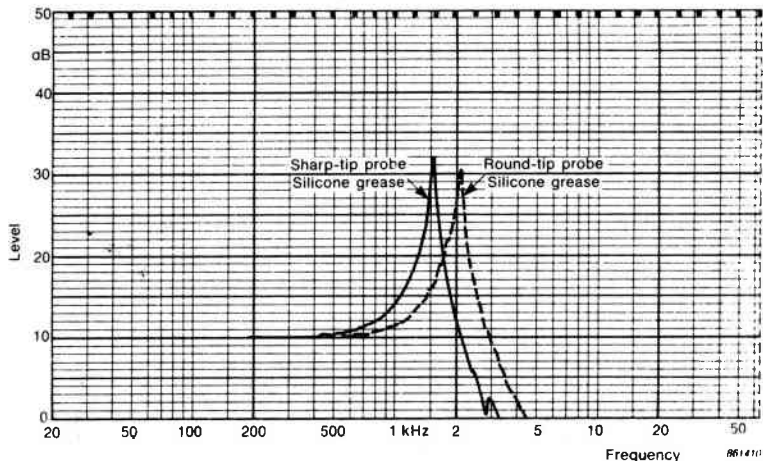
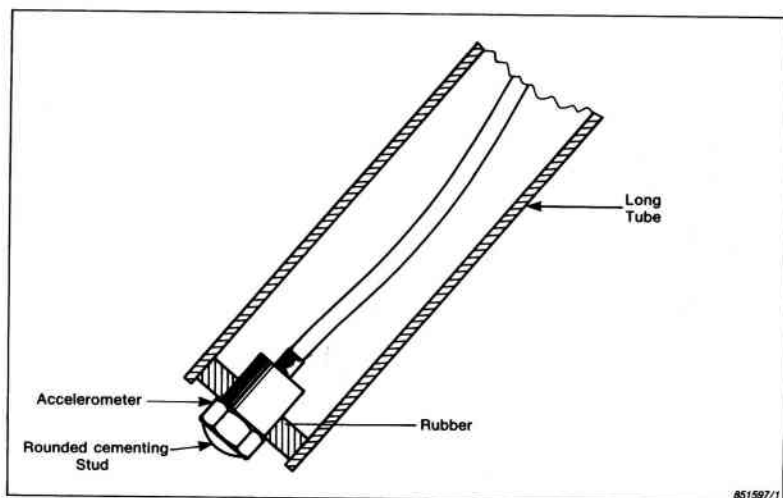
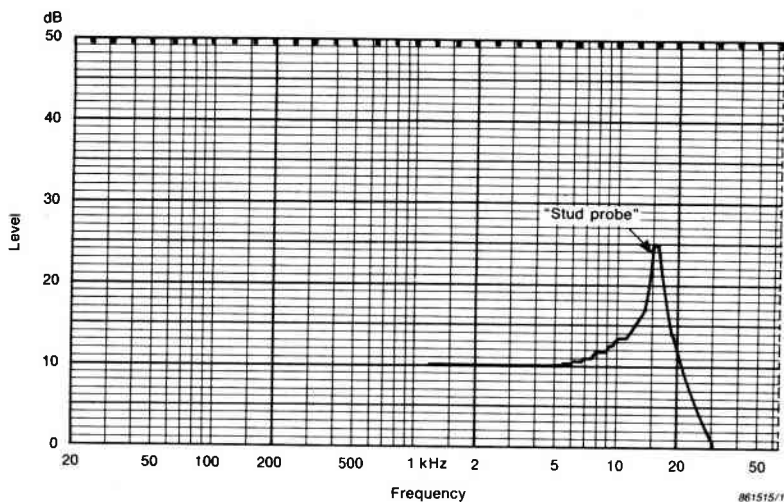


図4.20 ハンド・プローブ YP 0080型に固定した汎用加速度計の周波数応答。



051597/1

図4.21 プローブへの取り付け。ゴムはプローブの共振防止に役立っている。丸い接着した鋏頭は滑らかな接触面となる。



061515/1

図4.22 プローブに取り付けた汎用加速度計の周波数応答。



#### 注意：

1. シリコングリースの使用は結合剛性を上昇させるためである。先端の丸いプローブ (DB0544型) を使用すると周波数範囲が少し増加する。
2. 測定しようと思う点に手が届き難いような場合には、図4.21に示すような倒着型プローブを作るのも悪くない。丸い鋏頭を接着してプローブの触針として用いられる。これは図4.22に示すように先のプローブに比べて高い周波数までの性能がある。

### 4.5 メカニカルフィルタ

メカニカルフィルタUA0559型は非常に簡単、かつ有用でB&K社のほとんど全ての加速度計に使用できる。5個のセット(UA0553型)として入手できる。

つぎに、このメカニカルフィルタの応用の一覧を示す。

1. 高周波数かつ高いレベルの振動に混じった低周波数で、低いレベルの振動を測定するとき。
2. 高いレベルの衝撃による破損を防ぎ、零点移動効果を少なくする。
3. 試験物から加速度計を電氣的に絶縁する。
4. 組み込みのフィルタのないプリアンプを使用するとき上限周波数を設定する。
5. 横振動の影響を取り除く。

#### 4.5.1 説明

メカニカルフィルタUA0559型を図4.23に示す。試験物に設置するために、基部に10-32UNFのネジ孔のある丈夫な、腐蝕に強いステンレス製で、加速度計を設置するための10-32UNFネジが上面にある。上面部分は内部のブチルゴムに貼付されており、基部から電氣的に絶縁すると共に、試験物と加速度計との間でローパスフィルタとして作用する。メカニカルフィルタの側壁にある通し孔はこれに回し棒を通して上部と下部をお互いに締め付けたり、加速度計を締め付ける時にゴムが振じれないように役に立つ。また、回し棒は振動面にフィルタを締め付けるときのレンチとして使用でき、この許容トルクは1.8Nm (151bin)である。

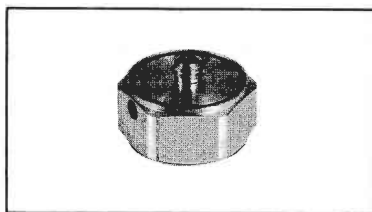


図4.23 メカニカル・フィルタ UA 0559型。

#### 4.5.2 性能と使用法

加速度計の主軸方向と横方向の応答に対するメカニカルフィルタの影響は図4.24にはっきりと現れている。これはローパスフィルタとして動作し、主軸方向と横方向の共振は減衰している。

通常の加速度計の共振点では公称の感度以上30dBの感度上昇があるが、メカニカル・フィルタを付けると高周波数域で40dB/decadeの減少が見られ、感度上昇は3から4dBにすぎない。更に、加速度計とフィルタの間に質量を付加することによって簡単に遮断周波数を調整することが出来る。横方向の感度も減少する。

フィルタ効果はゴムの剛性と減衰特性に支配されているので、温度の影響を受ける。低温ではゴム芯の剛性が増加し、共振周波数は上昇し同時に減衰は減少する。

高温では剛性が減少し、共振周波数も減衰も低下する。これらの特性は図4.25に示している。

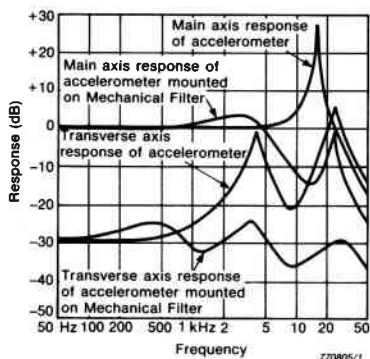


図4.24 メカニカル・フィルタ上に固定したB&K社製加速度計の主軸と横軸の周波数応答。

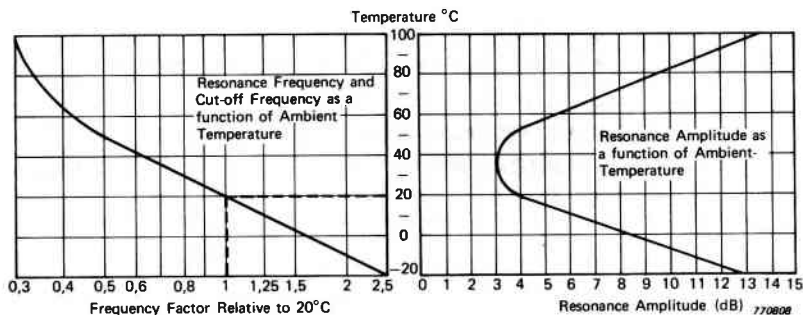


図4.25 UA 0559型の代表的な温度応答。

もし、メカニカル・フィルタを油やその他の炭化水素中の様な雰囲気中で用いる時はシリコンゴムのシール剤をフィルタの上面の回りや回し棒用の孔の中に使用すべきである。もっと詳細なことについてはB&K社の製品データ表に書いてある。

#### 4.6 加速度計用ケーブル

不正確な測定の原因は大抵不注意な加速度計の固定法と加速度計のチャージ・アンプを接続するケーブルに原因がある。その主な原因としてはつぎのようなものがある。

1. 同軸ケーブルが曲げられたり、圧縮されたり、引っ張られたりした時に、シールドメッシュがある点で誘電体から瞬間的に離れる。そして電気容量の局部的な変化が生じ、いわゆる“摩擦電気”による電荷が形成される。これは摩擦電気効果として知られており、特に低レベルの振動を測定するときにノイズの形で現れ問題となる。
2. 非常に強い電磁場がケーブルを横断する電圧を誘起し、測定信号の中に外部ノイズとして表れる。
3. 圧縮型の加速度計ではケーブルが振動しないように固定していなければ、曲げ応力がコネクタを通して圧電素子に加えられる。

雑音を減少させる処理を行った特殊な同軸ケーブルを用いることにより、摩擦電気ノイズは効果的に減少させられる。B&K社はこのケーブルを加速度計用の標準ケーブルとしている。ケーブルの低ノイズ性能を生かし、コネクタを破損しないためにもケーブルを鋭く曲げたり、捻ったりしてはならない。ケーブルの過度の振れは摩擦電気雑音の原因となるので試験面に固定すべきである。これは図4.26に示す。

第二点はケーブルを強い電磁場から離して注意深く通すことにより避けられる。もしこれが出来なければ、ラインドライブシステムかバランス型加速度計と特殊なケーブルを用いるべきである。

これらのシステムの利点は3.6節で検討されており、表3.1にまとめられている。8310型と2634型バランス型加速度計差動型チャージ・アンプの詳細については工業用加速度計の製品データシートを参照下さい。

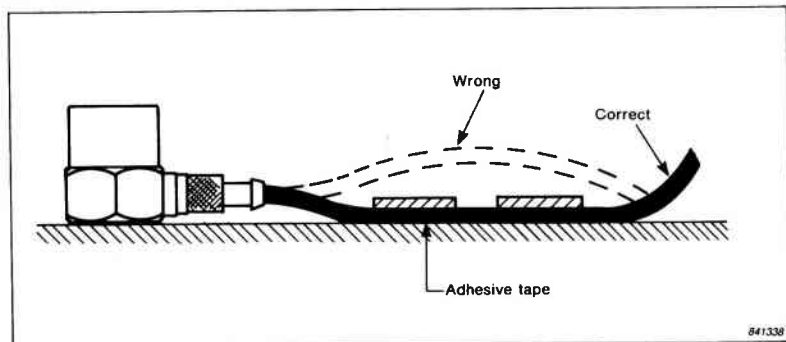


図4.26 ケーブル・ノイズを除去するための加速度計ケーブルの固定法。

B&K社の加速度計のケーブルのスリーブは湿気の多い雰囲気中で使用するため湿気を通さないテフロンで作られている。更に、ケーブル・コネクタが濡れるようなときには室温で硬化するゴムを用いて被覆する。湿気の影響については4.2.5節に詳細がある。保護線やカールケーブルなどB&K社のケーブルの種類については詳細なB&K社の加速度計のデータシート参照下さい。

ラインドライブ型加速度計は一本のケーブルだけで電力と振動信号を伝える。普通の12芯のケーブルは低雑音加速度計用ケーブルと比べて安価であるのでよく使われる。ラインドライブ型加速度計を電磁界中で使用すると、誘電電圧がケーブル中に発生する。

この電圧は3.6.3、3.6.4、3.6.6節で述べたグラウンドループ雑音に匹敵する。これらの節ではB&K社のラインドライブシステムは定電流電源システムよりグラウンドループ雑音に強いことを示している。しかし、工場内の苛酷な環境ではラインドライブアンプ用には同軸ケーブルの使用を推奨している。それ程きびしい雰囲気であればツイストペアのケーブルを用いることができる。

## 4.7 接地に関する注意

多点の振動測定システムでは測定装置のアース線の間で微弱な電流が流れることがしばしば起こる。この現象は複数個所でアースされたことに原因があり、各アース点の電位差が異なるためである。

接地は測定装置の電源コネクタの保護接地端子で行われる。

加速度計の容器が機械のような接地された構造物の表面に接触するときにもアース点となる。しかしながら、工場環境によっては機械はアースの電位でなく、アース電位より数ボルト高いことさえ珍しくない。このようなことは機械に適切な接地コネクタがないか、接地コネクタのインピーダンスが0ではない場合に起こる。

接続ケーブルのシールドメッシュは測定器のシャーシやケースを経て、接地されていることが多い。そこで、グラウンドループ電流がケーブルのシールドメッシュを経て1つの測定器から他の測定器へと流れる。グラウンドループは最終的に“ハム(hum)”の形で表れ、振動の出力信号に乗る。これが見かけ上の振動となる。これを防ぐには電流が流れる回路を遮断する必要がある。それには次のようないくつかの方法がある。

1. 測定装置は一連にして一点だけで確実に接地する。
2. プリアンプの接地線から入力ケーブルのシールドメッシュを絶縁するオプション付きのチャージアンプを選ぶ。これは“浮動入力”と言われている。プリアンプへのノイズ混入についての詳細な解析は3.6節に述べている。

3. 4.5.1に述べている方法で絶縁ネジを用いて加速度計を設置する。

工場で差動アンプを用いて平衡型の加速度計を絶縁して使用するのが賢明である。

このような加速度計システムの設計ではケーブルの電磁誘導ノイズの混入も減少する。このときのケーブルは2本の導線の各々が別個のシールドメッシュを持っている。両方のシールドメッシュは同じ妨害信号を拾い上げ、差動アンプはこれらの導体の信号の差に比例した出力を出すので、電磁誘導ノイズを効果的に消去する。またこのシステムでは、グラウンドループ電圧の影響も減少する。

## 5. 加速度計の較正と検査

### 5.1 序

振動測定値を物理量絶対値に対応付けが出来ない場合、圧電型加速度計の正確さ、信頼性、汎用性の価値が半減される。較正はこの点を一定の信頼性のもとで保証して加速度計を使うために行う。すなわち較正の有効な範囲内で環境や動作限界に関するデータを与えるために加速度計の試験を行う。


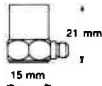

Calibration Chart for Accelerometer Type 4383		 Brüel & Kjær		Environmental: Humidity: Welded, Sealed Temperature Range: -74 to +250°C (-100 to +482°F) Max. Shock Acceleration: 20 kms <sup>-2</sup> peak Typical Magnetic Sensitivity (50 Hz - 0.03 T): 1 ms <sup>-2</sup> /T Typical Acoustic Sensitivity: 0,002 ms <sup>-2</sup> at 154 dB SPL (2 - 100 Hz) Typical Base Strain Sensitivity (at 250 με in base plane): 0,01 ms <sup>-2</sup> /με Typical Temperature Transient Sensitivity (3 Hz LLF): 0,1 ms <sup>-2</sup> /°C Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11- 1969	
Serial No.	1230172			Physical: 	
Reference Sensitivity at 50 Hz, 100 ms <sup>-2</sup>				Electrical Connector: Coaxial 10 - 32 UNF-2A	
and	23 °C				
Charge Sensitivity*	3.12 pC/ms <sup>-2</sup> or 30.5 pC/g				
Voltage Sensitivity* (incl. AO 0038)	2.75 mV/ms <sup>-2</sup> or 26.9 mV/g				
(Voltage Preamp. input Capacitance: 3.5 pF)					
Capacitance (incl. cable)	1134 pF				
Typical Capacitance of cable AO 0038	110 pF				
Maximum Transverse Sensitivity (at 30 Hz, 100 ms <sup>-2</sup> )	1.8 %				
Typical Undamped Natural Frequency	51 kHz				
Typical Transverse-Resonance Frequency, using Ex- citer Table 4290, with accelerometer mounted on a tita- nium cube by a 10 - 32 UNF-2A steel stud, mounting torque 1,8 Nm and greased surfaces:	10 kHz				
Polarity is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer					
Resistance minimum 20,000 MΩ at room temperature					
Date: 86.01.10	Signature: J.A.				
1 g = 9,807 ms <sup>-2</sup> or 10 ms <sup>-2</sup> = 1,02g					
* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards Washington D.C.					
BC 0163-12				Pat. DK 131401	

図5.1 較正表。 ここには、その加速度計の較正值やロットの較正值が記載されている。

B&K社で作られたすべての加速度計は非常に精密に製作され、品質管理されているので、高信頼性と特性の分散の少ないことが保証されている。さらに、加速度計は数種のパラメータについて正確なデータが得られるように個別に校正されている。校正といえば、しばしば感度の校正についてが主であるが、その他の周波数応答や、電気容量、質量、環境の影響などのパラメータも校正の情報として与えられる。各加速度計は多くの校正の情報を含んだ個々の校正図があつて完成品となる。この情報のあるものは特定の加速度に関するものであり、図5.1, 5.2, 5.3に示すように、加速度計の形式ごとに独特のものである。

この章の主旨は校正方法についての段階的な説明をすることではない。そのような事は校正装置の使用説明書に記載されている。この章で、校正の包括的な概念やB&K社の加速度計の校正と測定方法について述べる。

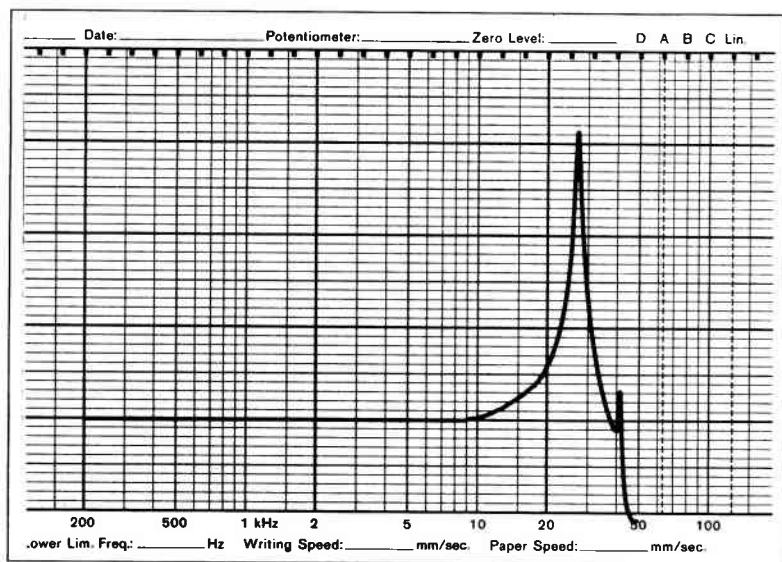
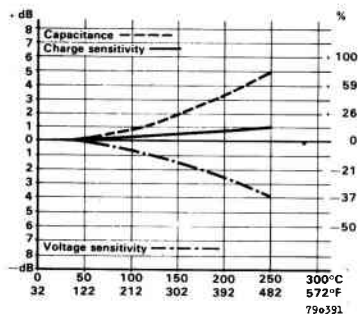


図5.2 校正表。 個々の加速度計に添付されている周波数応答の列。



**Typical Temperature Sensitivity Deviation:**  
(Piezoelectric Material PZ23)



**Mounting Technique:**

Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness.

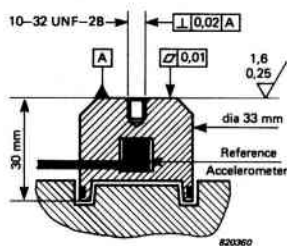
If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.

Fasten the 4383 using a 10-32 UNF-2A stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.

A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.

For other types of mounting, see B & K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

**Schematic Drawing of Exciter 4290:**  
(Modified laboratory reference)



**Material:** Stainless steel

**Mass of Exciter table:** 180 gram

**Mounted Resonance Frequency** obtained on the Exciter 4290 using the recommended mounting technique is shown on the attached individual **Frequency Response Curve**.

図5.3 較正表。 加速度計についての一般的な情報。

### 5.1.1 なぜ加速度計を較正するか

他の物理的量との関連を決まった精度で保障する目的以外にも較正を行ういくつかの理由がある。その多くの場合には法律上または契約上の要求から国際規格と比較して、変換器の正確さの証明を必要とする場合である。

加速度計が特別な構成、または、環境で使用されるとき、較正表に示されていないような加速度計の性能が問題になるかも知れない。この場合には、使用者自身が較正を行う必要があるが、添付の較正表は多くの応用に充分に使用できる。

多くの装置からなる測定装置のシステムをチェックする場合は特に較正の行程が重要である。システムの総合感度の計算をする時に迅速に較正チェック表を用いることにより誤差を避けることが出来る。これについては5.3.5節にその大略が書かれている。どのような較正を行う前でも、常に加速度計の周波数応答を測定して置くのが良い。何かの理由で加速度計が壊れていないかどうかをこれによって確かめることが出来る。損傷が起ると

周波数応答に乱れが現れる事が多く、そのような現象があれば加速度計が破損しているとか、よくて、周波数範囲が限定されているとかを意味する。このような場合はもはや較正は適正なものではなくなる。加速度計の周波数応答の測定については5.4.2節で述べてある。

## 5.2 較正規格の階層構造

### 5.2.1 階層の全体像

個々の変換器の絶対的な較正を行わずともよいようにするため、最初に標準変換器の階層的分类が確立された。この種の分類は図5.4に示されている。標準変換器は三つのグループに分けられる。

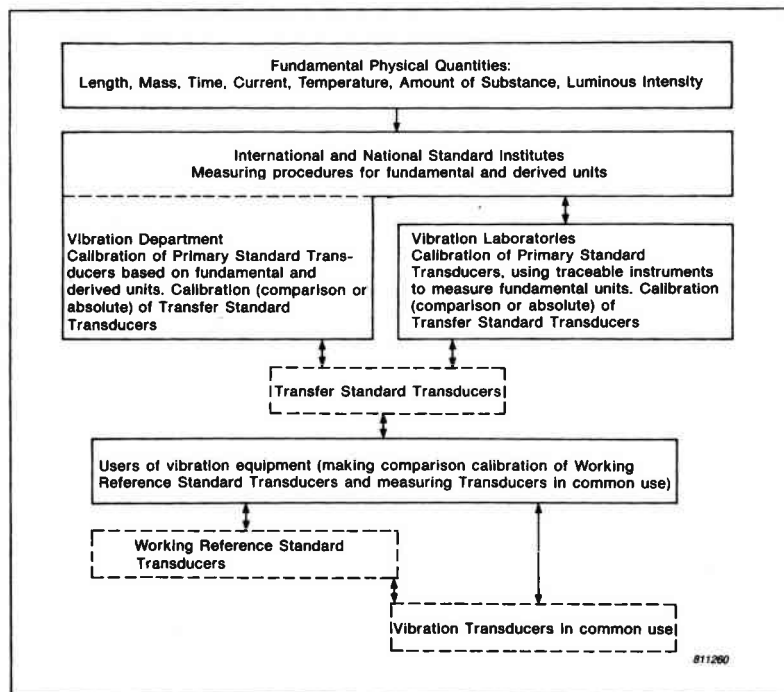


図5.4 較正規準の階層。

## 1. 第一次標準変換器

定義によれば、変換器の感度を基本的な物理的量で表すように関係づける方法を絶対較正方法と言う。この方法によって較正された変換器は第一次標準変換器である。そしてそれがこの階層の最上部に位置している。そのような変換器は国際的または、国家の規格協会あるいは特定の較正試験機関で較正され、保管されている。

## 2. 移動用標準変換器

これらの変換器は上述の協会や研究所で較正されている。それらは一次標準変換器との比較または絶対的方法によって較正されている。

移動用標準変換器はこれらの協会の中で一貫性を持たせるために、規格協会間で交換して再較正する。較正機関や規格協会の間の一貫性はこのようにして。移動用標準変換器を交換し、再測定することによって確立されている。またこれによって、“トレーサビリティ”も確立されるのである。トレーサビリティとは較正機関で行われる較正の一貫性にとどの規格協会が責任を持っているかをはっきりさせることである。

そこで、較正機関で較正された変換器はどの規格協会に規準を持っているか明示されている。

## 3. 実用参照標準変換器

これらは一般に使用される変換器の比較較正に用いられるものである。実用標準変換器は規格協会や較正機関で絶対法や比較法によって較正されている。それらは移動用標準変換器と比較検査される。このようにして一般に使用される変換器の較正の一貫性が保たれている。

### 5.2.2 B&K社の較正の階層構造

B&K社製の加速度計の較正は8305型標準参照用加速度計（図5.5参照）を用いて行われる。これはベースひずみの影響を受けないように圧電素子を中央上部に設置した片輪型の加速度計である。圧電素子として、温度変化に対して低感度で、優れた時間的安定性を持っている水晶の結晶PZ 100を十分に選定して用いている。この加速度計の上端には他の加速度計を設置するためのネジ孔があり、back-to-backで較正を行う。（5.3.3節参照）

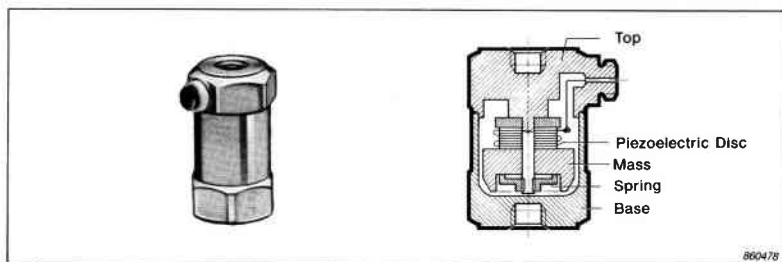


図5.5 8305型標準参照用加速度計。

この形式の加速度計はすべてレーザー干渉法によって絶対校正されている。(5.3.1節参照) さらに、3506型校正セットの8305型と2626型調整用増幅器は完全に一對としてレーザーによって校正されている。(図5.6参照)



図5.6 3506型校正用セット。

B&K社の校正部門からは年に何回か定期的に二つの3506型が米国商務省標準局(NBS)に送られている。これらの移動用標準器は郵送ではなく、常に手渡しでNBSに送られている。この手順によってB&K社はレーザーによる校正の一貫性を保証し、すべての8305型の標準がNBSに由来していることになる。

1組の第一次標準加速度計が使用されているが、それに加え一次標準器の破損に備えてデンマーク国内にもう1組の予備の標準器がある。

B&K社の他の加速度計は実用参照標準器としての8305型を用いてback-to-back法で半自動的に校正される。

各種の移動用標準器が世界中のB&K社のサービスセンタや他の校正機関の校正システムを点検するために常設されている。ここで、一般の使用者のためにあらゆる型式の加速度計が9559型校正システムを用いてback-to-back方法で校正される。(5.7.1章参照) 加速度計の種々のパラメータもこのシステムを用いて校正される。

このようにして、B&K社は製作時だけでなく、加速度計の購入後多年にわたってトレーサビリティの保証された校正ができる効果的な体制を作り上げた。この体制を図5.7に示している。

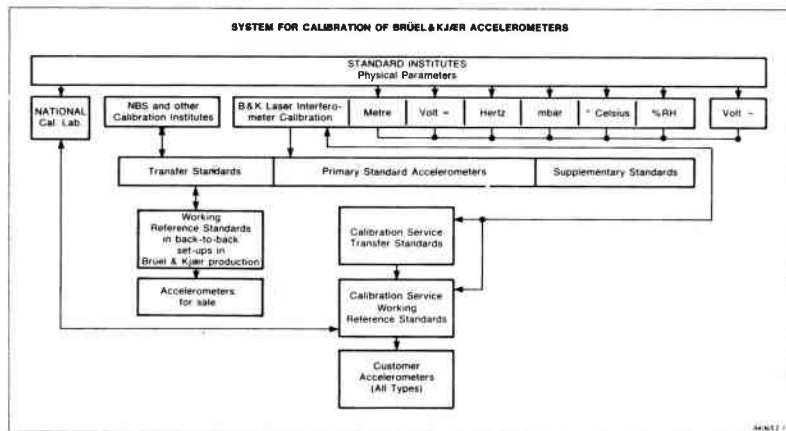


図5.7 B&K社の校正の階層。

### 5.2.3 較正方法の精度

トレーサビリティと精度の違いを理解することは重要である。トレーサビリティは規格協会で行われる較正との一貫性を意味している。そして、その較正は許容公差内にある。したがってもしどこかの較正機関が規格協会よりもさらに精度のよい測定器を使用すれば、その較正機関の較正データのばらつきは規格協会のものより小さくなるであろう。

種々の較正方法の精度を評価するためには、較正は定められた方法で行わなければならない。B&K社では英国較正局規準書No. 3003の方法を採用している。その方法では測定結果のばらつきは真の値の存在する区間の幅で表現され、その区間は中心値からの幅を(±)を用いて確率的信頼性と共に1つの値で表現される。そしてその真の値は(±)の限界内にある。便宜上較正の不確実性に影響するファクタは二つのカテゴリに分類される。

- a) ランダムばらつき
- b) 系統的なばらつき

絶対的と相対的な較正方法でのばらつきについて以下に検討する。

**絶対的方法** レーザー干渉計を用いれば理論上その振幅を0.02%の精度で求めることが出来る。しかしながら、実際の測定においては電圧測定(0.1%)、振動加振器のひずみ(0.1%)、加速度計の傾き(0.2%)、加速度計の横方向の動き(0.1%)の誤差が発生する。3506型較正セットと8305型標準参照用加速度計で行う絶対的な較正方法の不確かさは99%の信頼性で0.6%の誤差である。

**比較方法** この方法はNBSがB&K社の変換器を点検するために用いたものである。それはまた、B&K社が種々の加速度計を較正するのに用いる方法である。この方法では不確かさは0.95%より小さくなる。この値を上述の3506型較正セットによる絶対的較正法により生じる不確かさに加えることによって、この方法の総合誤差は99%の信頼度で1.12%と推定される。

これらの数値は絶対法を使ったB&K社のレーザー測定システムで得られたことを覚えていなければならない。しかしながら、NBSの相対法システムは1%の精度である。

そこで、もし3506型システムの精度にNBSの値を用いれば、相対法の全体の誤差は99%の信頼度で1.38%に増加する。

### 5.3 較正方法

感度の較正には三つの異なった方法がある。

1. 絶対法 レーザー干渉法と交換相互法はこの方法に属する。
2. 比較法 これは back-to-back 法に関連している。
3. 較正器 これは振動レベルの判った加振器を使用する方法である。

#### 5.3.1 レーザー干渉法

較正の絶対的方法は非常に特殊な装置の使用を必要とする。そこで、普通の加速度計の使用者はこの形式の較正を自分自身で行うことはまずない。

図5.8はB&K社で用いた8305型標準参照用加速度計と3506型較正セットの配置を示している。

測定器の配置はマイケルソン干渉計の周りに集中させる。レーザー・ビームは較正する標準加速度計の上の表面に当たるようにする。反射光線が同じ経路を通って戻ってくる方向から照射する。干渉計のビーム・スプリッタ(ハーフミラー)はこの経路上に置かれている。そして、加速度計の表面で反射された光線の一部がフォトダイオードに当たる。

フォトダイオードに当たるレーザー光線の他の一部はビーム・スプリッタで分かれ固定ミラーからの光線で、フォトダイオードの上でこれらの光の干渉じまが出来る。

フォトダイオードの増幅された出力は周波数比カウンターに入力され、振動の1周期の縞数を数える。この縞数は加速度計の全振幅に比例している。

振動周波数(正弦波)は正弦波発生器で発生される。その出力は外部クロックとして周波数比カウンターに加えられる。振動振幅は表示される比が正しくなるまで調整される。標準加速度計の電氣的出力はあらかじめ較正された調整増幅器とRMS差動電圧計を用いて測定される。

この較正装置ではレーザー干渉計によって8305型の変位の全振幅を測定する。加速度は周波数カウンターで読み取った周波数を用いて計算される。感度は加速度計の電氣的出力を測定し、加速度で割り算することにより得られる。

B&K社では、加振周波数は160Hz、加速度のレベルは $10\text{ms}^{-2}$ を用いる。

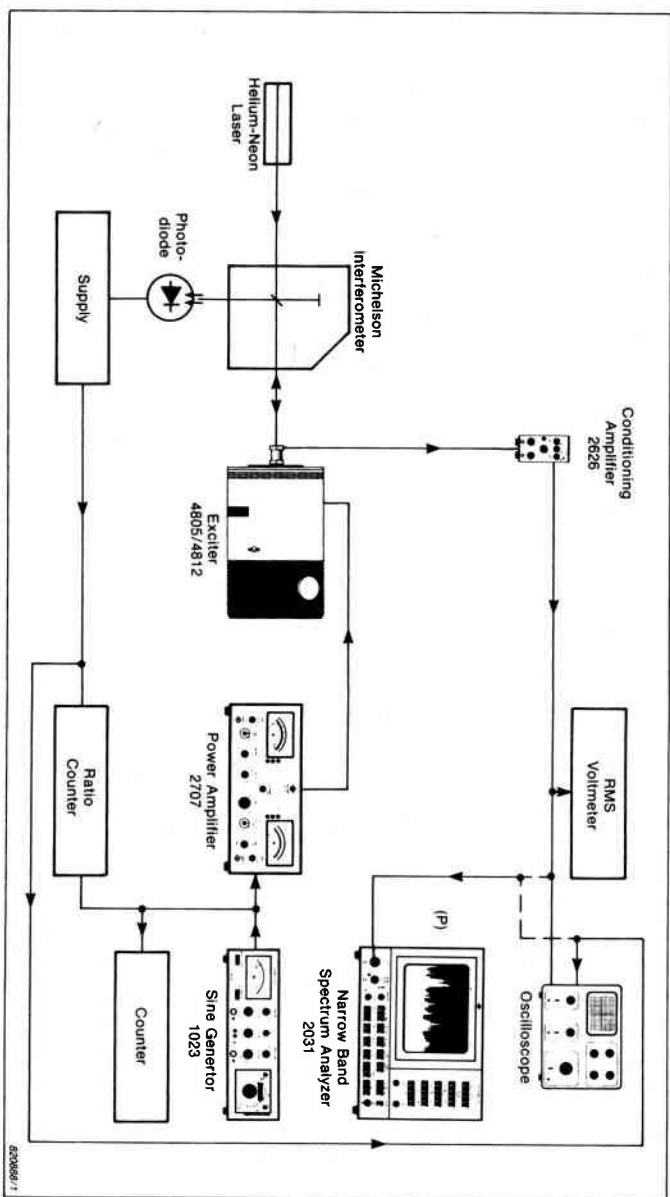


図5.8 B&K社のレーザー干渉計の装置。



### 5.3.2 その他の絶対較正法

他の絶対法もある。しかし、それらの方法はB&K社では使われていない。そこで、ここでは簡単に述べるにとどめる。その方法とは

1. **可逆変換較正** 最近までこの方法はB&K社の文献に、誰もが行える基本的な、平凡な設備で行える絶対法として示されていた。しかし、この方法は非常に複雑でよい結果が得られない。従って、このハンドブックには書いていない。
2. **重力による較正法** この方法では加速度計を垂直内の円周上で注意深く回転させ、重力だけを加速度計に作用させる。この方法は低周波数では実用的であるが、B&K社では使用されなくなった。

### 5.3.3 back-to-back法による比較較正

B&Kでは全ての形式の計測用加速度計の較正にback-to-backを用いている。B&K社では半自動システムを使用しているが、加速度計を自分で比較較正を行おうとする者は誰でも同じようなシステムを構成できる。

感度を測定しようとする加速度計を8305型標準加速度計と背中合わせにして、その結合したものを適当な振動源に据え付ける。両方の加速度計に同じ加速度が加わるから両者の出力の比がすなわち感度の比となる。

4815型較正用ヘッドを取り付けるのに適した4801型加振装置または4805型に4815型較正用ヘッドを取り付ければback-to-back法による較正ができる。4815型には8305型標準加速度計が組み込まれている。より詳細なことはB&K社の製品データを参照されたい。

最も簡単なback-to-back法の配置は図5.9に示されている。加速度計は一定周波数で加振されている。そして、その出力は（チャージ感度か電圧感度かの必要に応じて）チャージアンプまたは電圧アンプモードのプリアンプに加えられ、その出力を精度の判っている高品質のボルトメータで測定する。

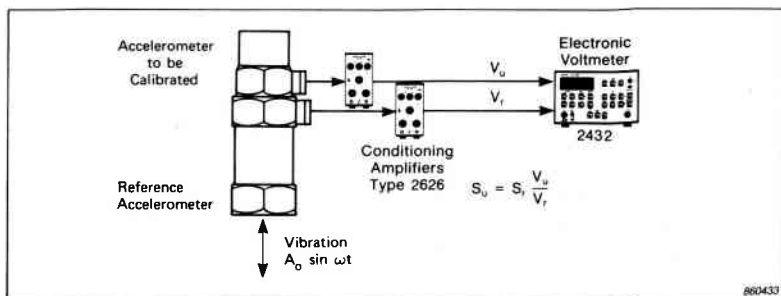


図5.9 加速度計のback-to-back較正法の簡単な配置。加速度計の信号はプリアンプを通じて電圧計に通じる。

前述のシステムは2920型感度比較器のような特殊な電圧計を使用することによって改良できる (図5.10参照)。感度が未知の加速度計とつながっている調整用プリアンプのゲインを2970型の振れが最小となるように調節する。そしてその加速度計の感度は調整用プリアンプのダイヤルの指示値である。

2970型は次のような役割を果たす。

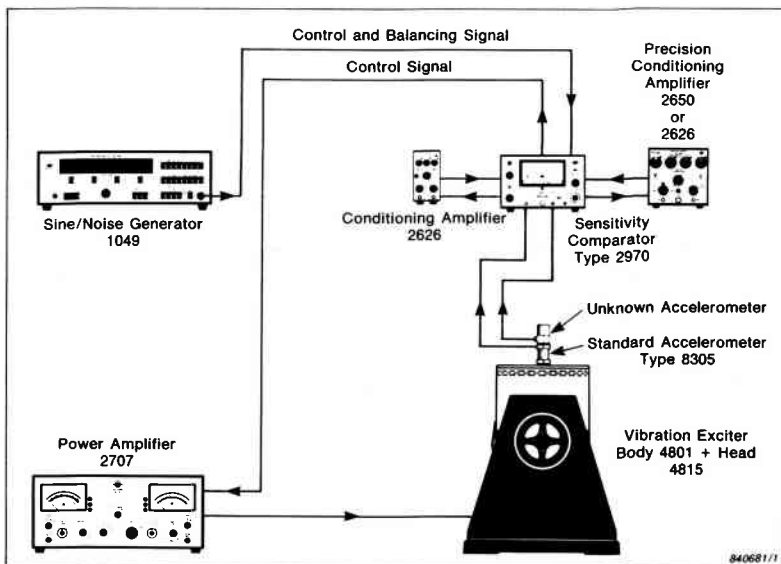


図5.10 高精度の較正ができる2970型感度比較計システムによるback-to-back較正法。

1. 出力の比較を簡単にする。
2. 較正手順を速くできる。
3. B&K社やNBCでの較正と同程度の精度となる。
4. 電圧感度とチャージ感度の較正の切り換えができる。

較正周波数や加速度レベルは使用する規格によって異なる。B&K社の測定では、周波数160Hz、加速度レベル $100\text{ms}^{-2}$ で加速度計は較正されている。2970型は60~250Hzの周波数で使用される。

実際には周波数や加速度レベルを加速度計の標準動作範囲内で使用する限り加速度計が較正されたレベルや周波数による相違は問題にならない。結局、加速度計は周波数帯域やダイナミックレンジ内において非常に線形性が良い装置である。2.5.2節では、圧電素子PZ23、PZ27を用いているB&K社の汎用加速度計のチャージ感度（と容量）は、周波数10倍になると2.5%の割合で減少している。それゆえ、違う周波数での感度が必要とされれば、この影響を考慮すればよい。たとえば、50Hzと160Hzの周波数では違いはおおよそ1.3%である。

電圧感度を測定した時には、その電圧感度はその時使用した加速度計とケーブルの組み合わせに対してだけ有効であることを覚えておかなければならない。したがって、もしケーブルを変えれば、その値はもはや無効である。

#### 5.3.4 FFTを用いたback-to-back較正法

高速フーリエ変換（FFT）を用いるback-to-back較正法もある。この方法ではB&K社の2チャンネル・アナライザ2032型か2034型を使用して加振器に高帯域ノイズを加える。基準加速度計と感度の判らない加速度計の出力を2チャンネル・アナライザに送ると、アナライザは周波数応答の計算をする。そして、平均化処理により、広い周波数範囲におけるその加速度計の感度や位相特性に関する答えが得られる。

どんな較正システムについても、その最終的な較正の精度はシステムを構成する個々の装置の精度や全周波数における基準加速度計の精度に依っている。この技術についての詳細なことについては近くのB&K社のオフィスにご連絡下さい。

### 5.3.5 較正済み加振器を使用した感度チェック

恐らく最も一般的で、便利に使われている感度チェックの方法は較正ずみの加振装置の利用である。B&K社はこのための専用装置を製作している。この方法は振動測定を行っている人々なら誰でも使用できる。

#### 較正用加振器 4294型

この小さくてポケットサイズでバッテリー電源を用いた装置は簡単な較正用加振器で、それは159.2Hz(1000rad/s)で、RMS加速度レベルは $10\text{m/s}^2$ に固定されて、RMS変位 $10\mu\text{m}$ 、RMS速度 $10\text{m/s}$ に相当する。その精度は $\pm 3\%$ よりよい。この装置は現場でのシステムの点検に理想的である。図5.11は測定用アンプを用いて、加速度計の感度を点検中の4094型を示している。

4294型二つの用途に用いられている。

1. 加速度計精度の検査
2. 測定システムの較正と調査

加速度計感度を調査するには加速度計を加振器のヘッドに取り付け、加速度計に接続されているプリアンプからの出力を測定するだけでない。このことは性能のよい電圧計を使用することによって達成される。

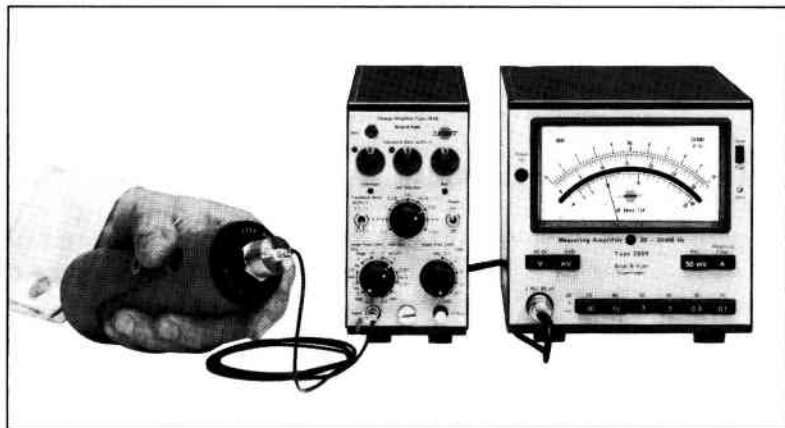


図5.11 4294型較正用加振器型。

4294型の魅力は加速度計からアナライザまで接続された測定装置全体を校正する能力があることである。個々の測定装置の感度に関係なく全体としての感度が測定できることである。

それに加えて、加振器によって作られた基準加速度が任意の測定器のフルスケールの振れに対応するようにゲインを調節することもできる。

#### 5.4 加速度計のその他のパラメータの測定

加速度計の感度は最も一般的なパラメータである。しかしながら、それは正確な測定のためのただ一つのパラメータではない。次のような項目についてもそれぞれの測定値を得たいものである。

1. 横方向の感度
2. 周波数応答
3. 取り付け共振周波数
4. キャパシタンス

B&K社の加速度計には、個々の加速度計についてこれらのパラメータの測定値が添付されている。環境パラメータの測定については5.5節で述べられている。

##### 5.4.1 横方向感度

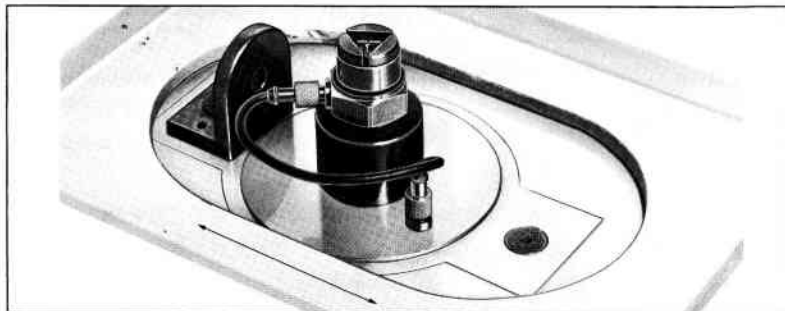


図5.12 B&Kで用いられている加速度計の横感度を測定するための特別の加振器。

B&K社では横方向の感度は図5.12に示したような専用の振動テーブルを用いて測定されている。加速度計を固定するテーブルは加速度 $100\text{ms}^{-2}$ 、30Hzで水平方向に振動する。同時に加速度計を固定した部分はその中心の周りにゆっくりと回転する。こうして加速度計に加えらるる横方向の振動の方向を変化させる。

加速度計の出力が測定され、最大横方向感度が判る。同時に最小の横感度方向もわかり、これはB&K社のほとんどの加速度計では赤印で示されている。

#### 5.4.2 周波数応答

図5.13は小型のものは除いてすべての測定用加速度計の周波数応答の測定のためにB&K社で用いられているものと同様の装置を示している。

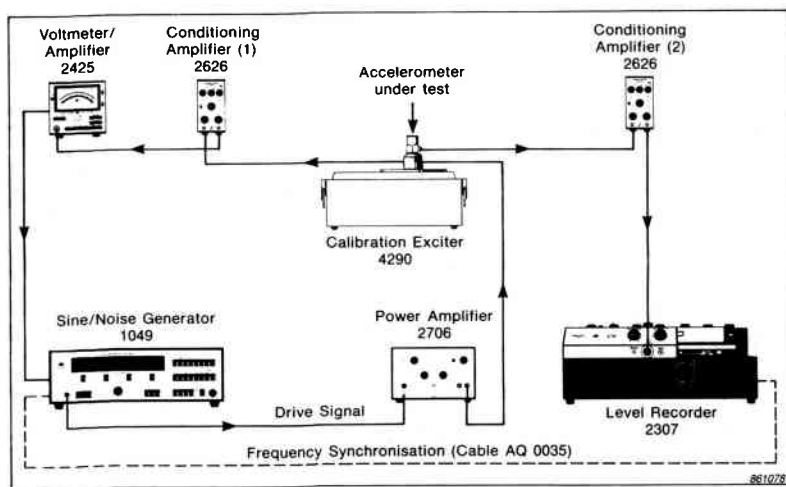


図5.13 加速度計の周波数応答を測定するための装置。

4290型校正用加振器(図5.14参照)は200Hzから50Hzの周波数範囲の正弦発振器によって駆動される。4290型の可動部は180gの鋼製のヘッドで、加速度計を最適の状態で固定できるようにきれいに仕上げられ、固定用ネジ孔がある。



図5.14 4290型校正用加振器。

テーブル上の加速度はフィード・バック（コンプレッサ回路）を経て、使用周波数範囲内で一定に保たれる。駆動装置に組み込まれている小型の加速度計は実際の加速度に相当する信号を出す。この信号は発振器のコンプレッサ部に加えられ、駆動ヘッドの加速度を一定にするように自動的に発振器の出力レベルを調節する。校正する加速度計からの出力はプリアンプを通し、レベルレコーダに送られる。

小型と8310型を除いて、B&K社の各加速度計はこの方法によって検査した個々の周波数応答が添付されている。校正表に示された取り付け共振周波数はこの曲線から決定される。ある特定の周波数での加速度計の応答が分かれば、標準的な周波数範囲以外でも使用できる。

この方法を用いて加速度計の周波数応答を測定する時は次のような点に留意すべきである。

1. 加振器のヘッドに加速度計を固定する方法が重要である。固定法が悪いと周波数応答曲線に誤差の多い結果となる。詳細については4.4節を参照下さい。

- 加振器のヘッド部分を一定の加速度に保つにはフィードバック回路の利得が充分でなければならない。したがって加速度の感度が測定周波数範囲内で一定であることを確かめた法がよい。そのためには制御用加速度計の出力をプリアンプを通してレベルレコーダに送り、プリアンプのゲインと発振器のコンプレッサ速度を適当に調整するとよい。この方法は正弦発振器や加振器の制御部の取扱説明書に述べられている。
- 30kHz以上では駆動装置のヘッドの加速度を一定に保つ回路の精度が急速に低下する。しかしながら、50kHzまでの範囲で取り付け共振周波数を確かめることは出来る。

### 5.4.3 固有振動数

このパラメータは振動測定にはほとんど必要ない。それでも基本的な加速度計の一項目であるので較正表に表示されている。これを求めるには二つの方法がある。

加速度計をケーブルで吊し、1 nFのコンデンサをつないで電氣的に励起する。減衰のない固有振動数は加速度計の電圧と電流の位相が同じである時の周波数で定義される。この近似値はコンデンサと加速度計での電圧を観察し、これらの間の位相が90°であるときの周波数を見つけることにより得られる。図5.15に最も容易にこの操作の出来る回路構成を示す。ここではオシロスコープでこれらの量を同時に観察している。加振周波数を調整して、リサージュの波形が円になったとき、正確な周波数が得られる。第二の方法として加速度計をケーブルで吊し、今度はその基部を軽く叩くことにより機械的衝撃を与える。加速度計の信号はチャージアンプを通してストレージ・オシロスコープに加え、減衰振動の軌跡が得られる。その振動の周期の逆数が固有振動数である。

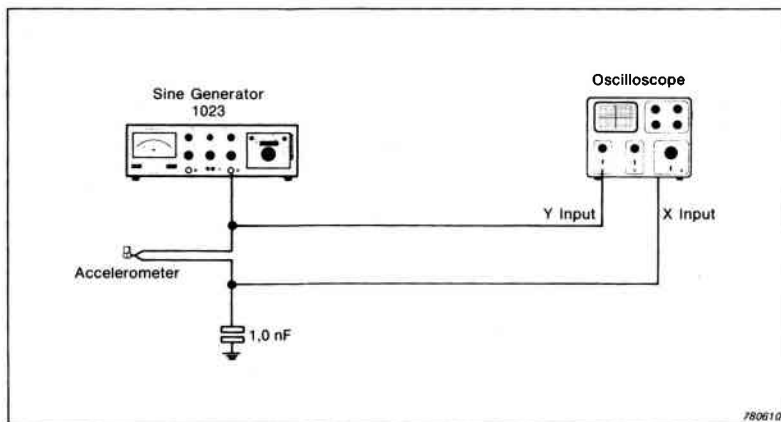


図5.15 加速度計の固有振動測定のための装置。



#### 5.4.4 キャパシタンス

加速度計の電気容量はチャージ感度と電圧感度の比として定義され、これらの二つの測定値から計算される。この値は校正表に記載されている。

もし、電気容量を電気容量ブリッジを用いて1000Hzで測定すれば、さきに述べた値とは異なった値が得られる。これは圧電素子は周波数が十倍変化すれば2.5%電気容量が変化するからである。加速度計の電気容量を求めるときはケーブルの電気容量の影響を差し引く必要がある。ケーブルの電気容量の代表的な値は校正表に書いてある。

### 5.5 加速度計の性能に対する環境の影響の決定

加速度計の校正表には環境に対する加速度計の感度の詳細が書いてある。この節ではこれらの感度を決定するためのB&K社で用いている方法について述べる。

#### 5.5.1 過渡的温度変化に対する感度

これは重さが加速度計自身の十倍位のアルミニウムのブロックの上に加速度計を固定し、室温より25℃温度の高い水を入れた容器中にゆっくりと入れる。装置に振動を与えないように注意しなければならない。

プリアンプは最低遮断周波数3 Hzの6 dB/オクターブ減衰にセットする。加速度計の最大出力はストレージ・オシロスコープで測定する。この出力を出すのに必要な加速度を加速度計の感度から計算し、温度変化で割ることにより過渡温度感度が得られる。

### 5.5.2 温度変化に対する感度

常温とは異なった温度で振動測定を行うとき、1～2 dB以上の測定精度が必要なならば、較正表より感度の補正係数を求めて補正するべきである。

その資料には常温での較正值からの感度と電気容量の変化のグラフの形で載っている。電圧、チャージ感度と電気容量などすべては温度によって変化する。B&K社の加速度計では温度に対する個々の較正は不必要である。というのは、圧電材料が同じであれば温度依存性も同じであるからである。温度曲線はロット毎に調べられ、同じ型の加速度計に対する較正表に印刷されている。

温度の影響を測定するため、加速度計は特別な加振器に取り付けたブッシュロッドの先端に固定する。ブッシュロッドの一端は恒温槽に挿入され、先端部分に被験加速度計が取り付けられる。槽外にある棒の他端には加振器と参照用加速度計を取り付ける。

B&K社で用いているものは大きさにもよるが同時に、20個の加速度計を取り付けることが出来る。較正は棒や取り付け台の共振による誤差をなくすために低周波数で行われる。温度の影響を測定する加速度計の温度が平衡状態になるまで待たなければならないのでこの測定には時間がかかる。温度勾配も加速度計に影響を及ぼすので避けなければならない。

この方法を用いて測定した電圧感度チャージ感度から加速度計の電気容量の温度変化が計算で求められる。

### 5.5.3 基部ひずみに対する感度

基部ひずみに対する感度は頑丈な鋼製の片持はりの固定端近くに加速度計を取り付けて測定する。ひずみゲージを加速度計の周りのはりに接着する。つぎにはりの自由端に変位を加えることによって、加速度計の基部に応力が作用する。

ひずみゲージからの出力は加速度計の出力とともにストレージ・オシロスコープで観測する。ひずみが $250 \mu \epsilon$ のレベルになったとき、加速度計の出力が測定され、同等の出力を生じるに必要な加速度を計算で求める。この加速度をひずみで割り、基部ひずみ感度が得られる。その代表的な値が加速度計に添付の較正表に載せてある。

#### 5.5.4 音に対する感度

音の発生器からの機械的な干渉を避けられないので加速度計の音の感度を正確に測定することは難しい。

B&K社では加速度計を特別な箱で校正する。その中では高音圧マイクロフォンの校正器により154dBの音圧を作り出せる。この装置によって加速度計に最小限の振動を与えることが出来る。

加速度計とプリアンプの出力は周波数分析器に加えられ、校正器は周波数掃引された正弦波で駆動される。加速度計の出力のスペクトラムから、信号の（どの部分）が音波によるもので、どれが加振器のピストンにより発達した振動によるものかを決定することが出来る。ふつう後者はそれが音波感度の仕様を2~100Hz帯域で定義されている理由である。ふつう100Hz以上の周波数域では前者を覆い隠してしまう。しかし、結果は数kHzの周波数まで有効であると考えてよい。これらの高周波数で音波の波長は加速度計の寸法と同程度である。

#### 5.5.5 磁界に対する感度

これも正確に測定することは難しい。B&K社では大きなコイルの中心に加速度計を置き、そのコイルに50Hzの電流を流し、交番磁界を作り出す。コイルの中心の磁界の強さは0.03Tである。電磁誘導による加速度計と固定具の運動を極小にするため、加速度計は重い固定具に強固に固定される。加速度計の出力を測定し、上述の例と同じように感度に変換される。

次の点に注意を払う。

1. 圧電素子の固定リングに誘導電流が発生することは避けられない。この電流と磁界との作用で、リングとそれに固定されている圧電素子が動く。
2. 加速度計内部の振動系の重錘は少し透磁性があるので、磁場の力を受けるがその影響は小さいだろう。
3. 電流が加速度計のケーブルに誘起される。

これらの効果の影響を分離することは出来ないので、全部を総合した影響を測定しそれを磁界感度とする。

### 5.5.6 温度の限界

加速度計の使用可能な最高温度と最低温度の限界は定められている。この範囲内での使用ならば加速度計は常温24時間放置した後ではいかなる特性の変化も発生しない。B&K社では加速度計をオープンで加熱したり、冷凍庫内で冷却したりして簡単に行っている。加速度計をそれから取り出して24時間後に全ての項目について校正する。2%の感度のばらつきは許している。

### 5.5.7 衝撃の限界

加速度計を液圧機械に取り付け、ある既知の衝撃レベルで短く連続で100回加速度計に衝撃を与えて衝撃の限界を決定する。これを加速度計の3軸(x, y, z)すべてについて繰り返した後、感度の校正と周波数応答の測定を行う。

感度の変化が2%以上となる最低の衝撃を衝撃限界とする。

また加速度計に接続したプリアンプが加速度計からの電荷に対応できる限界の衝撃の限界となる。稀にはあるが高い高度の加速度計で衝撃を測定する場合に、加速度計の出力をチャージ減衰器を用いて減衰させることもある。3.2.4節参照

### 5.6 加速度計用ケーブルの製品検査

図5.16はB&K社で使用している加速度計用ケーブルの低雑音の性能テスト装置である。ケーブルの一端には汎用加速度計に相当する負荷がつながって接続されており、他端にはひっぱり荷重を与えられている。ケーブルの出力はチャージアンプにつながっている。それから、ケーブルは両端を止め、中央を加振器に取り付けて中央を周波数80Hzの狭帯域のランダム振動を与える。ケーブルの出力を測定して、ノイズの多いケーブルは廃棄される。B&K社ではすべてのAO 0038型ケーブルは一つ一つ試験される。他のすべてのケーブルはロット検査 (Batch test) されている。

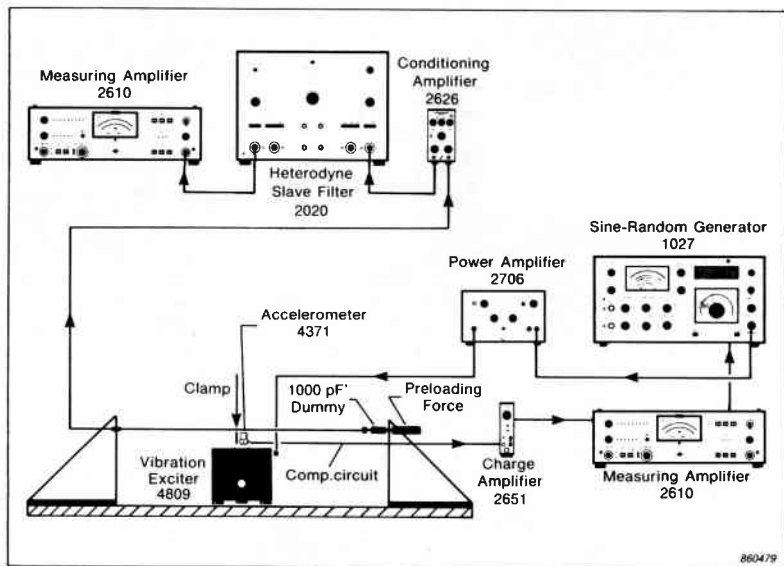


図5.16 加速度計のケーブルの摩擦電気ノイズ測定。

## 5.7 較正用機器

### 5.7.1 9559型較正システム

これは加速度計とマイクロフォンの較正のための完全な専用のシステムである。このようなシステムを備えておくと感度や周波数パラメータを較正することができ、較正の保証書を出すことが出来る。この様なシステムの例を図5.17に示す。

同じシステムが世界中のB&K社のサービス・センタで使用されており、同じシステムが販売されている。各システムには加速度計やマイクロフォンの較正のための完全な手順説明書が添付されている。9559型についてのもっと詳細に関して近くのB&K社の代理店に連絡されたい。

### 5.7.2 較正用機器の要約

図5.18にこの章で述べたB&K社より入手できる較正装置を要約している。



図5.17 9559型校正システム。

## 5.8 加速度計の校正に関する規格

B&K社での広範囲な加速度計の校正と試験は ISO-5347 “Method for the Calibration and Shock Pickup (振動と衝撃用ピック・アップの校正表)” に従っている。

この冊子は加速度計の種々の校正項目に関する望ましい校正方法について書かれているので、詳しく知りたい人はご参照ください。

校正についての規格には他に次のようなものがある。

ANSI S2.11-1969-“The selection of calibrations and tests for electrical transducers used for measuring shock and vibration”

ISO/DP 8042-“Characteristics to be specified for seismic transducers for shock and vibration measurements”

British Calibration Service Guidance Document No. 3003






<p><b>Type 4290 Calibration Exciter</b></p> 	<p>Small vibration exciter for use in accelerometer frequency response measurements. Used with B &amp; K Sine Generators.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Max. force level 3N. Frequency Range 200 Hz to 50 kHz</li> <li>■ Built-in accelerometer for level regulation of generator</li> </ul>
<p><b>Calibration Head Type 4815</b></p> 	<p>Primarily intended for high acceleration calibration of accelerometers and other measuring transducers using back-to-back and laser interferometer methods</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Built-in Standard Reference Accelerometer Type 8305</li> <li>■ Fits Exciter Body Type 4801 or Permanent Magnet Body Type 4805</li> <li>■ Accelerometer Calibration possible over a frequency range from 5 Hz to 10 kHz</li> </ul>
<p><b>Type 2970 Sensitivity Comparator</b></p> 	<p>Rapid back to back comparison calibration of accelerometers. Used together with Calibration Set Type 3506 and Precision Conditioning Amplifier Type 2650.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Calibration accuracy <math>\pm 1,02\%</math> at 99% confidence level</li> </ul>
<p><b>Type 4294 Calibration Exciter</b></p> 	<p>Pocket-size vibration reference source for calibration of accelerometers or measuring systems.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fixed RMS level <math>10 \text{ ms}^{-2} \pm 3\%</math> at 159,2 Hz (1000 rad/s)</li> <li>■ Internal batt. supply (1 x IEC 6LF22)</li> </ul>
<p><b>Type 3506 Calibration Set</b></p> 	<p>Consists of Reference Accelerometer Type 8305 plus Conditioning Amplifier Type 2626 calibrated as integral pair using laser interferometry method. For use in accelerometer calibration set-ups.</p>

図5.18 B&K社製の校正装置の一覧。

T01019GB0





## 6. 付 録

付録 A  
単位変換表

m	cm	mm	ft	in
1	100	1000	3,281	39,37
0,01	1	10	0,0328	0,3937
0,001	0,1	1	0,00328	0,03937
0,3048	30,48	304,8	1	12
0,0254	2,54	25,4	0,0833	1

T01087GB0

表 1. 長さの単位の変換表

m/s	km/h	ft/min	mile/h
1	3,6	196,85	2,2369
0,2778	1	54,68	0,6214
$5,08 \times 10^{-3}$	$1,829 \times 10^{-2}$	1	$1,136 \times 10^{-2}$
0,4470	1,6093	88	1

T01088GB0

表 2. 速度の単位の変換表

g	m/s <sup>2</sup>	cm/s <sup>2</sup>	ft/s <sup>2</sup>	in/s <sup>2</sup>
1	9,81	981	32,2	386
0,102	1	100	3,281	39,37
0,00102	0,01	1	0,0328	0,3937
0,03109	0,3048	30,48	1	12
0,00259	0,0254	2,54	0,0833	1

T01089GB0

表 3. 加速度の単位の変換表

kg	tekma	gram	lbs	oz
1	0,102	1000	2,2046	35,274
9,807	1	9807	21,6205	345,93
$10^{-3}$	1,02 $10^{-4}$	1	2,205 $10^{-3}$	3,527 $10^{-2}$
0,45359	4,625 $10^{-2}$	453,59	1	16
2,835 $10^{-2}$	2,8908 $10^{-3}$	28,35	6,25 $10^{-2}$	1

T01091GB0

表 4. 質量の単位の変換表

N	kp	lb ft/s <sup>2</sup>
1	0,102	7,2329
9,807	1	71,0
0,1379	1,405 $10^{-2}$	1

T01090GB0

表 5. 力の単位の変換表

N/m <sup>2</sup>	mbar	mm H <sub>2</sub> O	atm	in WG	psi
1	$10^{-2}$	0,102	9,869 $10^{-6}$	4,02 $10^{-3}$	1,4505 $10^{-4}$
100	1	10,917	9,868 $10^{-4}$	0,402	1,4504 $10^{-2}$
9,807	9,807 $10^{-2}$	1	9,678 $10^{-5}$	3,937 $10^{-2}$	1,4223 $10^{-3}$
1,013 $10^5$	1013	1,0332 $10^4$	1	406,77	14,696
249,10	2,491	25,4	2,453 $10^{-3}$	1	3,605 $10^{-2}$
6908,9	69,089	704,49	6,805 $10^{-2}$	27,736	1

T01092GB0

表 6. 圧力の単位の変換表

J = Ws	kWh	kpm	kcal	Btu	ft lb
1	2,778 $10^{-7}$	0,1020	2,39 $10^{-4}$	9,48 $10^{-4}$	0,7376
3,6 $10^6$	1	3,6710 $10^5$	860	3413	2,655 $10^6$
9,807	2,7241 $10^{-6}$	1	2,3423 $10^{-3}$	9,2949 $10^{-3}$	7,233
4187	1,163 $10^3$	427	1	3,9685	3087,4
1056	2,93 $10^4$	107,59	0,25198	1	778
1,3558	3,766 $10^{-7}$	0,1383	3,239 $10^{-4}$	1,285 $10^{-3}$	1

T01094GB0

表 7. 仕事、エネルギー、熱の単位の変換表

kW	kpm/s	hk	kcal/h	ft lb/s	hp
1	102	1,36	860	738	1,34
9,81 $10^{-3}$	1	1,33 $10^{-2}$	8,44	7,23	1,32 $10^{-2}$
0,735	75	1	632	542	0,986
1,16 $10^{-3}$	0,119	1,58 $10^{-3}$	1	0,858	1,56 $10^{-3}$
1,36	0,138	1,84 $10^{-3}$	1,17	1	1,82 $10^{-3}$
0,745	76	1,014	642	550	1
2,93 $10^{-4}$	2,99 $10^{-2}$	3,99 $10^{-4}$	0,252	0,216	3,93 $10^{-4}$
3,52	35,9	0,479	3024	259	0,471

T01096GB0

表 8. 仕事率の単位の変換表

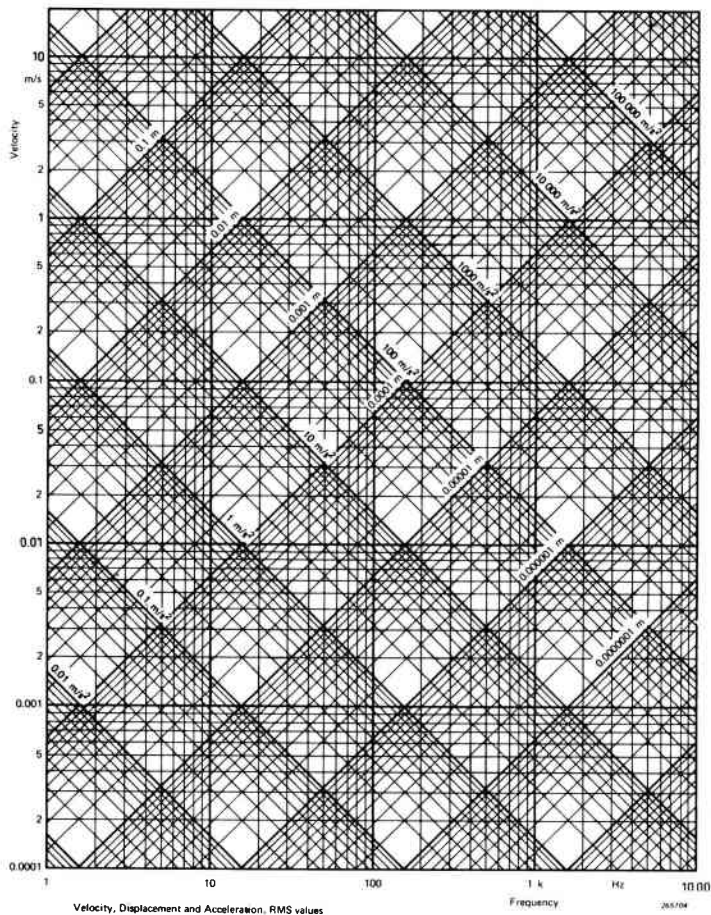
Symbol	Prefix	Multiple
G	giga	$10^9$
M	mega	$10^6$
k	kilo	$10^3$
c	centi	$10^{-2}$
m	milli	$10^{-3}$
$\mu$	micro	$10^{-6}$
n	nano	$10^{-9}$
p	pico	$10^{-12}$

T01235GB0

表 9. 接頭語

付録 B  
振動のモノグラム (読取図表)

振動のモノグラムは正弦波振動の周波数、変位、速度、加速度の間の関係をグラフで表したものである。上記のパラメータのうち2個を与えれば、他の2個を図から簡単に読み取れる。



## 付録 C 振動の規格

規格というものは次々と新しく生まれかつ世界中に多種多様の規格があるので、一般的な規格を少々集めても限定された価値しかない。しかしながらB&K社は“National and International Standards and Recommendations-Acoustics, Vibration & Shock, Luminance and Contrast”を出版しているので、必要な方は近くのB&K社の代理店に請求して下さい。この本にはこの分野の世界中の主な規格とその発行元のアドレスを掲載してある。

## 付録 D 振動に関するB&Kの参考書

B&Kは振動分野に関する技術教育用の非常に多くの出版物を発行している。それらを分類して下記に示す。

**入門書** A4サイズのテキストでいくつかの分野ごとに簡単な理論と応用について書いてある。振動の分野ではそれぞれ振動測定、振動テスト、マシンヘルスマニタリングに関する3冊の入門書がある。これらはB&K社の地域代理店に請求すれば入手できる。

**アプリケーションノート** これは定期的に発行される短論文である。その内容は現在関心を持たれている特定の分野におけるB&K社製機器の応用例である。

**テクニカルレビュー** これは4回発行され、B&K社の機器の応用と、B&K社製機器の利用者に帯する製品や開発の情報である。

本 振動分野のいくつかの本がB&K社から出ている。たとえば、

**"Mechanical Vibration and Shock Measurements"**

**"Frequency Analysis"**


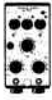
**"Modal Testing – Theory and Practice"**

**"Modal Analysis of Large Structures"**




アプリケーションノートとテクニカルレビューのバックナンバーリストは代理店にあります。

## 付録 E

現在のB&Kのプリアンプ類の要約。2644型ラインドライブアンプについては第3章に述べた。さらに詳細についてはアンプに添付された製品データシートをご参照下さい。

Preamplifier Type		2635 	2626 
Measurement Modes		Acceleration Velocity Displacement	Acceleration
Amplifier Sensitivity		0,1 mV to 10 V/pC (-20 to + 80 dB)	0,1 mV to 1 V/pC (-20 to + 60 dB)
Frequency Range (-3 dB limits)		0,1 Hz to 200 kHz	0,3 Hz to 100 kHz
Selectable Frequency Limits (-3 dB limits)	Low	0,2; 1; 2; 10 Hz (10% limits)	0,3; 3; 10; 30 Hz
	High	0,1; 1; 3; 10; 30; > 100 kHz (10% limits)	1; 3; 10; 30; > 100 kHz
Power Supply		Internal batteries or Ext. DC	AC Mains
Other Features		Overload indicator. Test oscillator. Battery condition indicator	Overload indicator. Direct and transformer coupled outputs
Applications		Field measurement of vibration. Underwater sound measurement with Hydrophones	General purpose measurements. Comparison calibration of accelerometers






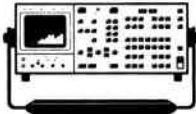
<p style="text-align: center;"><b>2651</b></p>  <p><b>3-Uni-Gain sensitivity settings. Charge amplifier. Very low frequency measurement capability</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>2634</b></p>  <p><b>Small, robust, adjustable gain, charge amplifier. Excellent electromagnetic radiation immunity</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>2650</b></p>  <p><b>4 digit sensitivity conditioning. Low noise charge and voltage amplifier</b></p>
<p style="text-align: center;">Acceleration Velocity</p>	<p style="text-align: center;">Acceleration</p>	<p style="text-align: center;">Acceleration</p>
<p style="text-align: center;">0,1–1–10 mV/pC (–20 to + 20 dB)</p>	<p style="text-align: center;">0,9 to 10 mV/pC internally adjustable (0 to 20 dB)</p>	<p style="text-align: center;">0,1 mV/pC to 100 mV/pC. 100 mV/V (–20 to + 40 dB)</p>
<p style="text-align: center;">0,003Hz to 200 kHz</p>	<p style="text-align: center;">1 Hz to 200 kHz</p>	<p style="text-align: center;">0,3 Hz to 200 kHz</p>
<p style="text-align: center;">0,003; 0,03; 0,3; 1 Hz</p>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">0,3; 3 Hz; 2 kHz</p>
<p style="text-align: center;">200 kHz</p>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">1; 3; 10; 30; &gt; 200 kHz</p>
<p style="text-align: center;">Ext. DC</p>	<p style="text-align: center;">Ext. DC</p>	<p style="text-align: center;">AC Mains</p>
<p style="text-align: center;">Input signal- ground floating or grounded</p>	<p style="text-align: center;">Normal or differential input. Can be fixed to machine frames</p>	<p style="text-align: center;">Overload indicator Test oscillator</p>
<p style="text-align: center;">Multi-channel measurements shock measurements</p>	<p style="text-align: center;">Vibration measurements in industrial environments Permanent installations</p>	<p style="text-align: center;">Comparison calibration of accelerometers. General measurements</p>

T00969GB1

付録 F

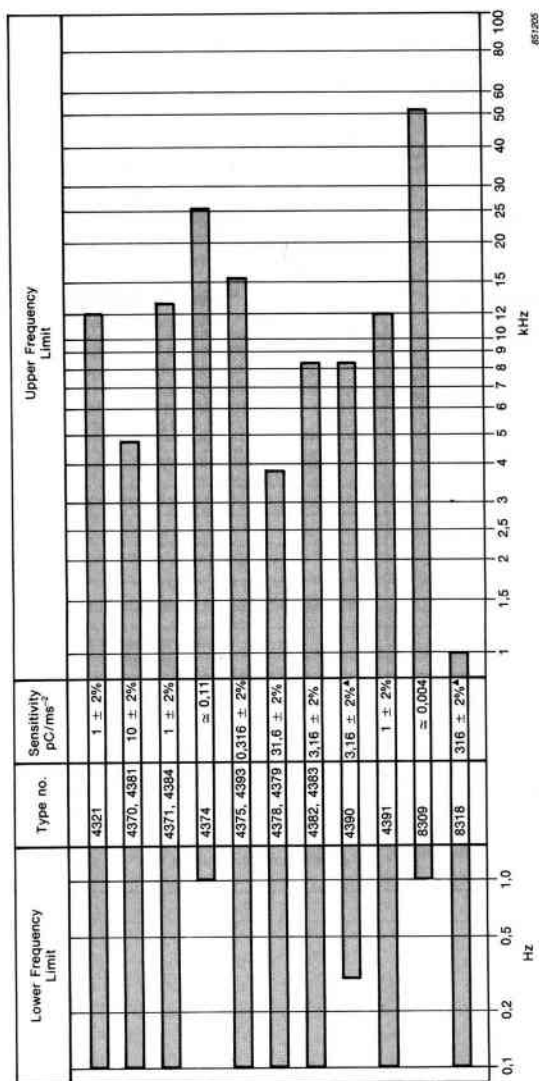
加速度計は下記の計器に直結できる。詳細についてはこれらの製品に添付の製品データシートをご参照下さい。

Instrument Type	<p style="text-align: center;">2511</p>  <p style="text-align: center;">Vibration Meter</p>	<p style="text-align: center;">2513      2516<sup>3</sup></p>  <p style="text-align: center;">Integrating Vibration Meters</p>
Description	A versatile vibration meter for general vibration measurement	Economical and accurate vibration meters for day-to-day use
Measurement Modes	acceleration, velocity displacement	acceleration, velocity
Frequency range (-3 dB)	0,3 Hz to 15 kHz	10 Hz to 10 kHz <sup>1</sup>
Selectable frequency limits (-3 dB)	LLF 1,3 and 10 Hz <sup>1</sup> ULF 1 and 15 kHz <sup>2</sup>	LLF <sup>2</sup> 8 Hz and 10 Hz ULF <sup>2</sup> 1 kHz and 10 kHz
Detectors	RMS True Peak-to-Peak	One minute L <sub>eq</sub> RMS, Max. Peak
Power Supply	Internal battery external DC	Internal battery
Input	Charge	Charge
Notes	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 0,3 Hz and 3 Hz for acceleration mode</li> <li>2. With 1 kHz Selected the 2511 can be used in vibration severity measurements</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. When linear weighting is selected</li> <li>2. Related to linear, Hand-Arm and Vibration Severity measurements (ISO/DP 5349 and ISO 2954)</li> <li>3. 2513 uses SI units. 2516 uses imperial. 2513/WH 2134 is a simplified version of these instruments</li> </ol>

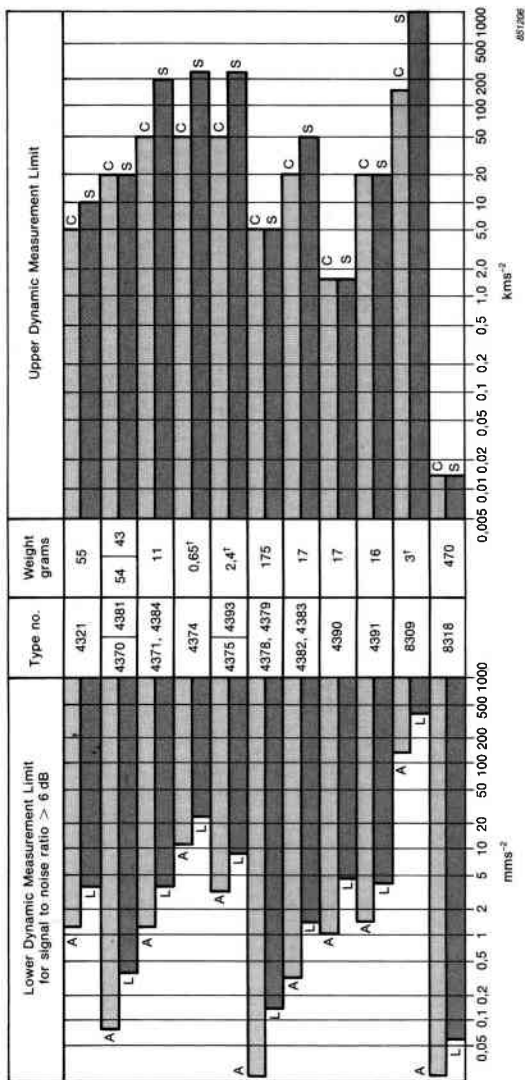
<p style="text-align: center;"><b>7007 ZM 0060</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>Tape Recorder</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>2515</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>Vibration Analyzer</b></p>
<p>A fully portable instrument for field and laboratory recording of vibration and sound data using plug-in module ZM 0060</p>	<p>A powerful FFT analyzer for machine vibration analysis, including machine health monitoring, fault diagnosis and balancing</p>
<p>acceleration, velocity</p>	<p>acceleration, velocity, displacement (<b>analogue</b>)</p>
<p>0,3 Hz to 16 kHz<sup>1</sup></p>	<p>0,3 Hz to 20 kHz (-1 dB)<sup>1</sup></p>
<p>LLF 0,3, 1 and 10 Hz —</p>	<p>LLF 0,3 Hz or 3 Hz ULF up to 8 selectable, depending on <b>analysis mode</b></p>
<p>—</p>	<p>Total RMS in addition to many frequency <b>analysis options</b>.</p>
<p>Plug-in battery box external DC</p>	<p>Internal battery, external DC</p>
<p>Charge</p>	<p>Charge, Voltage, Line-drive</p>
<p>1. Depends on tape speed</p>	<p>1. The following facilities are available: Constant Percentage Bandwidth analysis (8% and 23%), Narrow Band Analysis, Zoom Analysis, Scan Analysis, Cepstrum Analysis, Speed Compensation, Spectrum Comparison, Mass Storage</p>

100043/001

付録 G



汎用の加速度計の上限および下限周波数(10%)と感度。▲印はラインドライブ型で感度の単位は  $\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$  である。測定可能な加速度の下限および上限値と加速度計の重量。



481/06

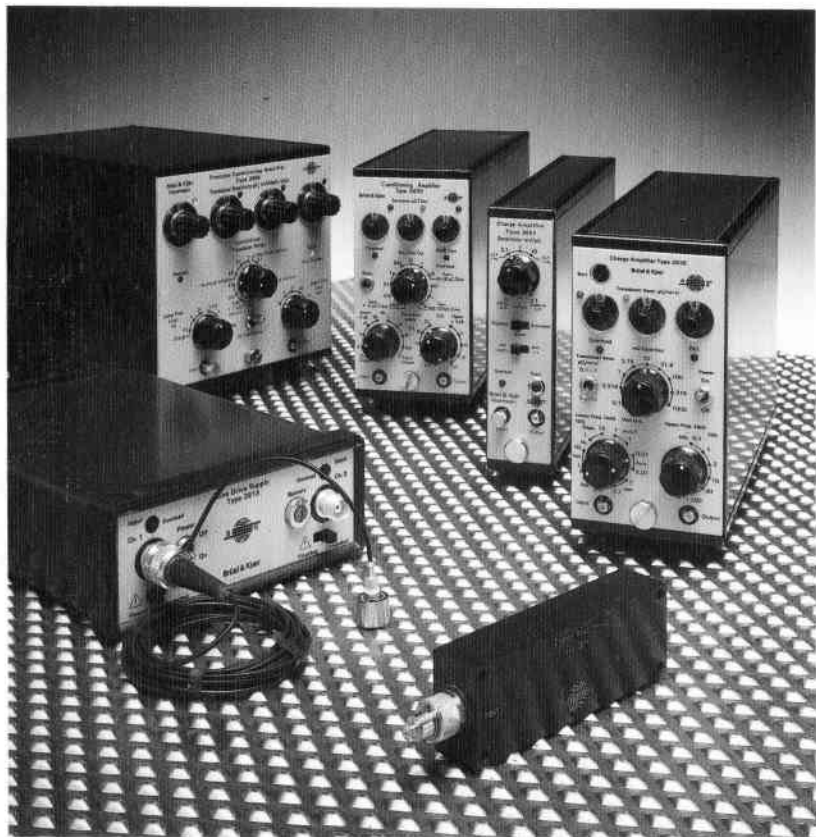
上限値はピーク値でCとSはそれぞれ連続的正弦値と衝撃値に対応している。下限値はRMS値でAはその加速度計の+10%上限周波数までの1/3オクターブバンド幅測定、Lは2 Hzから22kHzチャージアンプを使用した。+印はケープル重量を含まない。

付録 H

Type	Weight (gram)	Sensitivity		Frequency Range + 10% Limit (kHz)	Notable Characteristics	Application Areas
		Voltage mV/ms <sup>-2</sup> (mV/g)	Charge pC/ms <sup>-2</sup> (pC/g)			
4374	0,85 (excluding cable)	≈ 0,18 (≈ 1,8)	≈ 0,11 (≈ 1,1)	26	Miniature Shear Type with extremely low weight and high resonance frequency Integral cable Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity	High level and high frequency vibration measurements Shock measurements Vibration measurements on delicate structures and in confined spaces
4393	2,4	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (31,0 ± 2%)	16,5	Miniature Delta Shear <sup>®</sup> Type with low weight and high resonance frequency	
4375	2,4 (excluding cable)	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (31,0 ± 2%)	16,5	Miniature Delta Shear <sup>®</sup> Type with low weight and high resonance frequency. Integral cable	
4391	16	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (98,1 ± 2%)	12	Delta Shear <sup>®</sup> construction with Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity featuring an insulated base and TNC top connector	Suitable for general shock and vibration measurements
4371	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (98,1 ± 2%)	12,6	Side Connector	
4384	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (98,1 ± 2%)	12,6	Top Connector	
4382	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Top Connector	
4383	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	Side Connector	
4390	17	3,16 ± 2% $\mu$ A/ms <sup>-2</sup> (31,0 ± 2% $\mu$ A/g)		8,4	Line-Drive accelerometer with Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity and Delta Shear <sup>®</sup> design	
4370	54	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Top Connector	Delta Shear <sup>®</sup> construction with higher Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity
4381	43	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	Side Connector	
4378	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Top Connector	Very high sensitivity Uni-Gain <sup>®</sup> Type accelerometers of Delta Shear <sup>®</sup> construction
4379	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	Side Connector	
8318	470	316 ± 2% $\mu$ A/ms <sup>-2</sup> (3100 ± 2% $\mu$ A/g)		1	Delta Shear <sup>®</sup> design featuring built-in Line-Drive preamplifier and very high sensitivity Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity	Very low level vibration measurements Built-in low pass filter gives well defined upper frequency limit
8309	3 (excluding cable)	≈ 0,04 (≈ 0,4)	≈ 0,004 (≈ 0,04)	54	Small size. 5mm integral fixing stud. Integral cable	Shock measurements up to 1 million ms <sup>-2</sup> . High frequency vibration measurements
4321	55	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (98,1 ± 2%)	12	Three Delta Shear <sup>®</sup> accelerometers of the same Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity combined into a single unit	For measurements of vibrations in 3 mutually perpendicular directions
4322	350	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (98,1 ± 2%)	0,1 in rubber pad	Three Delta Shear <sup>®</sup> Uni-Gain <sup>®</sup> type accelerometers mounted in a rubber and metal housing	Type 4322 is used with the Type 2512 Human Response Vibration Meter to measure Whole Body Vibration
8305	40	-	≈ 0,125 (≈ 1,25)	5,3 (2% limit)	Quartz element with very high stability and wide temperature range. Laser calibrated to ± 0,6% accuracy	Reference Standard Accelerometer for back-to-back calibration of accelerometers
8310	100 (excluding cable)	≈ 1,0 (≈ 10)	1 ± 2% (98,1 ± 2%)	9	Integral stainless steel cable and high temperature operation up to 400°C. Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity	Industrial accelerometers designed for use in the most severe environmental conditions often encountered in permanent vibration monitoring situations
8315	102	≈ 2,5 (≈ 25)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	8,1	Electrically balanced and insulated for low noise in strong electromagnetic fields	
8317	112	3,16 ± 2% $\mu$ A/ms <sup>-2</sup> (31,0 ± 2% $\mu$ A/g)		7,5	Built-In Line-Drive amplifier for low noise Safe for use in explosive environments. Uni-Gain <sup>®</sup> sensitivity	

10/000001

現在B & Kが出荷している加速度計の要約。詳細については最新の汎用加速度計、産業用加速度計、標準参照用加速度計等の製品データシートを参照下さい。



## 松賢機器株式会社

本社 大阪府吹田市豊水町3丁目25番13号 和7電機ビル 電話 06(386)8901  
 東京営業所 東京都港区芝大門2丁目12番7号 南和電ビル 電話 03(438)0781  
 東京技術センター 東京都港区芝3丁目3番10号 芝屋ビル 電話 03(456)3861  
 中部営業所 名古屋市名東区亀の井3丁目17番地 電話 052(704)4141  
 九州営業所 福岡市中央区大名2丁目9番30号 凌ビル 電話 092(712)9017

Japanese BB0763-11