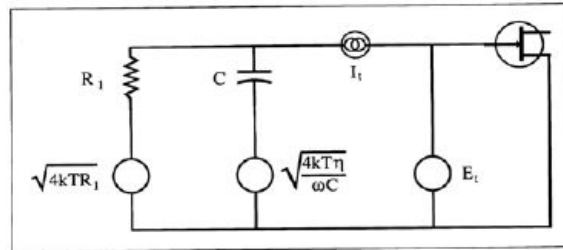




# 加速度計のノイズ

圧電型トランスデューサーがプリアンプに接続された場合のノイズ源はこれまでもさまざま議論されています。低振動レベル、低周波測定は、加速度計に使われている圧電材料の電気機械的な効率やプリアンプ特性によって制限されます。

一般的にノイズは不要な信号ですが、加速度計のパフォーマンスを低下させるノイズは、センサー用プリアンプの電気部品によって発生するノイズによって制限されます。下の図では、電圧または電荷アンプとしての圧電型加速度計用の、一般的なプリアンプの入力段が示されています。



ここで C は、Q ファクターの反転と同等の損率  $\eta$  でのピエゾ素子のキャパシタンス、 $R_1$  はバイアス抵抗器、またアクティブデバイスは、接合型電界効果トランジスタ(JFET)、または金属酸化物半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)になります。

損率はピエゾ材料と機械的アセンブリーの損率の合計ですが、その範囲は 0.05~0.001 となります。低損率は、加速度計の共振周波数でプリアンプが過負荷にさせるような、加速度計のリングングを起こさせることがあります。

低周波カットオフ以上のプリアンプのパワースペクトル密度はその結果、 $\omega R_1 C > 1$  は、

$$E_n^2 = \frac{4kT}{\omega^2 C^2 R_1} + E_i^2 + \frac{I_i^2}{\omega^2 C^2} + \frac{4kT\eta}{\omega C} \quad \text{since } \eta \ll 1 \quad (1)$$

Kはボルツマン係数で、 $1.38 \times 10^{-23}$  ワット秒/ケルビン、Tは絶対温度のケルビン、 $E_t$  は $\sqrt{\text{Hz}}$ あたりのトランジスターノイズ電圧、 $I_t$  は $\sqrt{\text{Hz}}$ あたりのトランジスターノイズ電流、及び $\omega$ はラジアン/秒での角周波数 $2\pi f$ を示します。

抵抗 $R_2$ の値を、ジョンソン(熱)ノイズが、電流ノイズ $\times$ その抵抗により発生する電圧ノイズに等しくなるとすると、

$$\begin{aligned} 4kTR_2 &= I_i^2 R_2^2 \\ R_2 &= 4kT/I_i^2 \\ I_i^2 &= 2qI_{GSS} \end{aligned}$$

ここではqは $1.6 \times 10^{-19}$  クーロンの電荷に等しく、 $I_{GSS}$  はトランジスタのゲート漏れ電流であり、よって室温では

$$R_2 = 4kT/2qI_{GSS} = 0.05/I_{GSS} \quad \text{となります。}$$

$I_{GSS}$  は約10°Cの上昇を倍増、または室温と120°Cの間で千倍になり、JFET内部は衝突電離のためにドレインゲート電圧に依存していることに留意して下さい。一般的に、室温でのJFETの $I_{GSS}$  は300fA以下ですが、その結果、 $R_2$ の値は167G $\Omega$ になります。室温での低シグナルMOSFETの $R_2$ は約1T $\Omega$ となります。

(1)の等式は次のように置き換えることができます。

$$E_n^2 = \frac{4kT}{\omega^2 C^2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + E_i^2 + \frac{4kT\eta}{\omega C} \quad (2)$$

$E_t^2$  は約1kHz以下では周波数に反比例しますが、これは1/fノイズと呼ばれます。

初項は周波数の平方根に反比例し、そのため低周波ノイズを制御します。バイアス抵抗 $R_1$ は $R_2$ よりも小さな値であるため、低周波でのノイズはパッシブ部品 $R_1$ やCにより圧倒的に支配されます。 $R_1$ が大きすぎる場合、低周波応答は温度により支配されます。



Vを電圧、Qを加速度計の電荷感度とします。Q = VC、またA<sub>n</sub><sup>2</sup>を加速度でのパワースペクトル密度とすると等式(2)は次の通りになります。

$$A_n^2 = \frac{4kT}{\omega^2 Q^2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + E_i^2 + \frac{E_i^2 + 4kT\eta(\omega C)^{-1}}{V^2} \quad (3)$$

低周波では加速度ノイズは電荷感度に反比例することが分かります。より高い入力インピーダンスをもったMOSFETは低周波ではより低ノイズになります。しかしながら、MOSFETは、トランジスタよりも大きなリークをもっているデバイスを使って、電圧過負荷による破壊から保護する必要があります。また、MOSFETは、低ノイズNチャンネルJFETよりも少なくとも10倍高いノイズ電圧をもっており、非常に低ノイズのプリアンプには決して使用しません。PチャンネルJFETは、NチャンネルJFETよりも若干ノイズが高くなっています。

高い周波数では等式(3)の第2項が加速度のノイズを制御します。すべての特性が同じと仮定した場合、より高い電圧感度が望まれます。高い電圧感度をもった圧電材料は、損失率の低下によって十分オフセットされない低い比誘電率をもっており、そのため等式(3)の最後の項の分子の2番目の項η/Cは、圧電材料よりも高い材料となります。

例えば、非常に低いノイズのJFETを使った、約5kHzの領域での中間周波数におけるクォーツ加速度計の加速度ノイズは、クォーツが圧電素子の電圧感度から倍であるにもかかわらず、圧電素子を使ったセンサーよりも大きくなります。低い比誘電率の結果低キャパシタンスのトランスデューサーは、入力トランジスタミラー効果や、いくらかの浮遊容量を含む入力キャパシタンスにより、シャントのため比較的減された電圧感度を持ちます。さらに、低インピーダンス源での非常に低い周波数における動作では、極めて高いインピーダンスのMOSFETの使用が必要となりますが、これはノイズを発生します。

等式(3)によると、R<sub>2</sub> > R<sub>1</sub>であることを前提として、低周波ノイズはバイアス抵抗R<sub>1</sub>の値を上げれば低くなります。但し実際の測定では、ある一定の値以上ではR<sub>1</sub>が上昇するにつれ低周波ノイズも上昇します。バイアス抵抗を通じて流れるリーク電流によって発生するサーマルノイズを超えたノイズは過剰雑音と呼ばれますが、これはさらなるノイズ源となります。これは短時間電弧によって引き起こされ、そのパワーは周波数に反比例しており、メーカー、材料、製造工程などにより、抵抗値の上昇とともに上昇し、抵抗の出力定格とともに降下します。過剰ノイズはカーボン抵抗では最大に、巻線抵抗では最小になります。過剰ノイズのパワースペクトル密度は、

$$\frac{NI^2 \times 10^{-12}}{2.303f} I_{GSS}^2 R_1^2 \quad (4)$$

ここではNIはμV/V/周波数ディケードで表現されたノイズインデックス、fは周波数です。

よって、1Hzでの過剰ノイズのパワースペクトル密度 = 4.34 x 10<sup>-13</sup> (NI<sub>GSS</sub><sup>2</sup> R<sub>1</sub><sup>2</sup>) となります。この抵抗のサーマルノイズのパワースペクトル密度は4kTR<sub>1</sub>です。

## 光学校正による加速度計の補正

加速度計はフリッジ消失法を使って校正できますが、加速度計のベース周辺を取り囲む小さいミラーを付けて、センサーを振動表面の中心に置きます。ミラーはレーザーの反射表面として働きます。

この校正方法はテーブルが無限に硬く、そのためミラーと取り付けエリア間に存在する相関動作エラーがなければ（周波数の2乗でエラーが増加）この校正方法では加速度計の取り付けポイントの実際の動きは感知できません。<sup>注1</sup>

加振テーブルの半径に比較して加速度計の半径の方が小さい場合、加速度計の質量は半無限ソリッドの境界の一部に分布します。均一分布による平均偏差は、

$$\frac{16}{3\pi^2} \left( \frac{P(1-\nu^2)}{aE} \right) \quad (A)$$

ここではPは加振力、aは負荷の半径、Eとνは半無限ソリッドのヤング係数とポアソン比です。<sup>注2</sup>

加速度計ベースの半径の1.2倍のセンターにミラーのセンターが置かれた場合、偏差の度合いは(A)のカッコの0.25倍になります。加振力Pは加速度計の質量と同等×その加速度であるため、ミラーの変位への加速度計の平均変位の率は小さい補正となり、

$$\left( \frac{16}{3\pi^2} - 0.25 \right) \left( \frac{M(1-\nu^2)}{aE} \right) \omega^2 \quad (B)$$

となります。ここではMは加速度計の質量、ωは角周波数 = 2πf

ポアソン比0.3、係数 $3.4 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ のアルミナテーブルに、20gmの重さで、半径6.35mmの加速度計のベースを取り付け、加速度計の周辺から1.6mmでミラーがある場合、光学測定への補正值は、10kHz、20kHzで-3.8%では-0.96%になります。上記から引き出されることは、加速度計のベース材料の弾性率は、テーブル材料の係数よりも相当低いと仮定できます。補正の上限である無限係数の加速度計のベース材料に対して補正は1.7倍で増加します。高周波での高精度測定には重要で数多くの制限があるため、これらで分かることは純粋に技術的嗜好をする人たちだけが興味を持つ事柄なのかも知れません。<sup>注3</sup>

注1 Workman, David R., "Methods for Calibration of Vibration Measurement Reference Standards," Martin Marietta, Denver, CO, 1987.

注2 Timoshenko, S., Theory of Elasticity, First Edition, Ninth Impression, McGraw-Hill, Chapter 11, pg. 333, 1934.

注3 Barrett, Richard M., Schloss, Fred, "High Frequency Vibration Measurement Limitations," Proceedings Institute of Environmental Sciences, April, 1990.



ノイズインデックスNIが100GΩ、60mWチップ抵抗が2,500μ V/Vの測定で、 $2.4 \times 10^{-9}$ のパワースペクトル密度となるのに対し、サーマルノイズのために値は $1.6 \times 10^{-9}$ となります。しかしながら、250mWのチューブ状抵抗のNIは10倍低くなります。I<sub>GSS</sub>は指数関数的に温度とともに上昇するため、低周波では過度のノイズが支配するかも知れません。

テーブル1では電気機械的効率の降順で、加速度計に使用されている材料がリストされています。第2項目の値は、圧縮型のフォース単位当たりの電荷ですが、これは等式3)の電荷感度Qに直接比例しています。第3項目には単位圧力あたりの電界がリストされており、これは電圧感度Vに比例しています。

材料が圧電特性を失う温度はキュリー温度です。ロッシェル塩はもっとも高い効率をもっていますが、運の悪いことに55°Cで融解します。ジルコニウム酸チタン酸鉛(PZT)は、その多くの形成で数多くの用途向けに必要な特性が種々あり、効率は約50%で、その高い電荷感度をもっていることにより、低周波、低ノイズ加速度計用には広く利用されている材質です。

表1 圧電材料の特性

材質	電気機械的効率 (%)	フォース単位当たりの電荷 (pC/N, 圧縮)	圧力単位当たりの電界 (mV M/N, 圧縮)	相対比誘電率	キュリー温度 (°C)
ロッシェル塩	84	500	160	350	55
ジルコニウム酸チタン酸鉛 (PZT)	50	350	25	1,700	350
チタン酸バリウム	23	150	14	1,200	120
メタニオブ酸鉛	12	75	35	240	550
ニオブ酸リチウム	10	21	28	84	1,150
リン酸アンモニウム (ADP)	7.8	24	177	15	低い
チタン酸ビスマス	2.0	16	10	165	660
フッ化ビニリデン樹脂 (PVDF)	1.8	22	190	13	160
トルマリン	0.8	1.9	30	7	840
石英	0.7	2.2	50	4.5	573



## 現実的に考慮すべき点

低周波における低ノイズは、例えば1Hzで $100 \mu\text{g}$ 、または $1\text{mm}/\text{sec}^2$ と極めて低いために工業用では特に重要となります。高周波でのノイズは、リーク検知やその他の特殊な用途以外では重要ではありません。低周波レベルの検知をするためには、電氣的ノイズはSNレベル10(20dB)で約 $10 \mu\text{g}$ 程度に低く抑える必要があります。等式(3)で抵抗をパラレルで $1\text{G}\Omega$ とすると、加速度計に必要な電荷感度は $63\text{pC/g}$ となりますが、これは圧電素子を使用している、共振周波数が30kHzの加速度計の値にほぼ近くなります。共振周波数を1kHzに下げると、 $15,000\text{pC/g}$ の電荷感度を達成します。

過去にはADP、ロッシェル塩やほかの材料が使用されていましたが、今日では、工業用加速度計には圧電セラミックス、ニオブ酸リチウム、石英、PVDFなどが変換用に使用されています。ジルコニウム酸チタン酸鉛(PZT)セラミックスは石英に比較して、機械エネルギーから電気エネルギーへの変換効率は75倍高いため、共振周波数、慣性質量及び圧電エレメントを使い、同じデザインで作られたトランスデューサーでは、PZTのトランスデューサーで達成可能な電荷感度は約100倍高くなります。

メタニオブ酸鉛、フッ化ビニリデン樹脂、トルマリン、及び石英の電圧感度は、ジルコニウム酸チタン酸鉛のそれよりも大きいのですが、これまで述べてきたように、すべての点を考慮すると、より高い電圧感度は必ずしも高周波でのノイズを低く抑えることはできません。

圧電セラミックスの特長により、数多くの広帯域低ノイズ加速度計のメーカーや、ソナー変換器、医療用センサー、ポケベル、点火装置などのメーカーによりPZTを圧電材として広く使用されています。