

低周波機械振動監視：測定に関する留意点

工業用設備の低周波監視には、低周波専用のセンサー、装置、及び測定技術が必要になります。低周波振動測定では最も重要な用途は、センサーや監視装置からの電気的なノイズを最小化することです。測定環境周辺や機械の近辺にある電気ノイズや機械ノイズは、低周波測定に悪影響を及ぼすことがあります。また、センサーのセトリングタイムや処理時間も考慮に入れておく必要があります。これらを踏まえた上で適切なセンサーの取扱いや取付け技術を取り入れることにより、高品質な測定結果が得られます。

低周波測定について

低周波振動監視は、予知メンテナンスプログラムを統合したものです。低速の機械不良は、壊滅的なダメージを機械に与え、製造ラインの停止、また作業者が危険にさらされることもあります。最新のセンサー、装置、解析手法によって低周波振動を測定することが重要になります。

「低周波コンディションモニタリング」は、通常 $0.1\text{Hz} \sim 10\text{Hz}$ ($6 \sim 600\text{CPM}$) のバンド幅以内での測定を意味します。具体的な用途としては、製紙機械、クーリングタワー、低速攪拌機などがあります。ギアボックス、コンプレッサー、及び高速機械もこの範囲で不具合を示すこともあります。構造的かつ物理的測定には非常に低い周波数用装置や技術が求められます。

低周波用途は通常の監視よりも複雑で、振動振幅や機械の健康状態に対しての、加速度、速度、及び変位の関係は、測定技術やデータ解析などで注意深く定義をする必要があります。 10Hz 以下の動作においては変位として(図1)ほとんど振動を生み出しません。低速での加速度振幅の測定では、特別なセンサーや低周波用エレクトロニクスを必要とします。

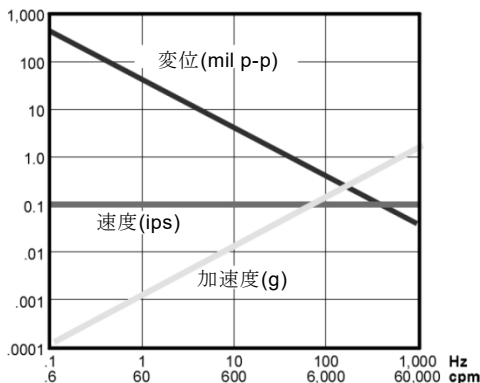


図1：一定の速度での変位、速度、及び加速度の関係

低周波読み取り結果は通常、速度(ips)または変位(mil p-p)で表され、加速度測定は電氣的に積分、またはソフトウェアで変換されます。振動は速度センサーや近接プローブなどで測定されますが、これらのデバイスは圧電式加速度センサーなどが備えている汎用性を欠きます。(図2)

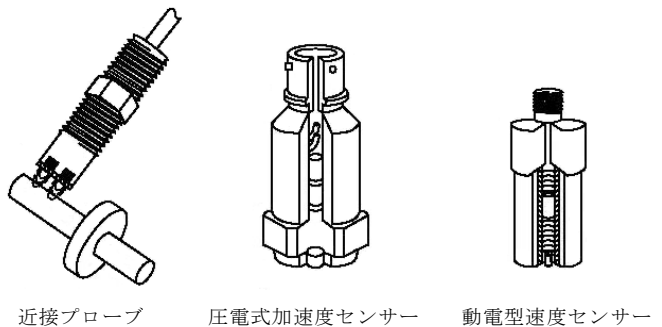


図2：センサーの種類

図 3 に例としてポンプ測定が示されています。加速度センサーからの出力が変位、速度、加速度で表示されています。変位のプロットでは最も強い低周波がありますが、167Hz (10,000 CPM)から上のスペクトルは減衰されています。加速度の表示では最も広い周波数範囲が示されています。

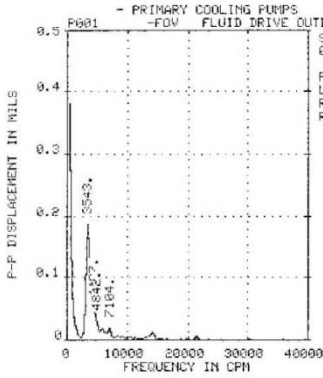


図 3a : 加速度の 2 重積分による変位

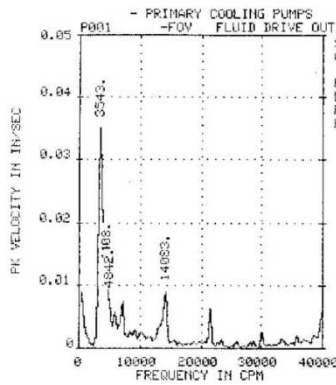


図 3b : 加速度の 2 重積分による速度

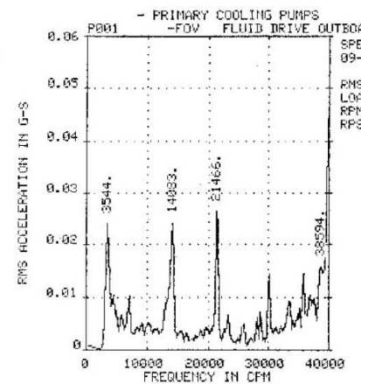


図 3c : 加速度の 2 重積分による加速度

低周波測定用装置

低周波におけるセンサー

多くの低周波測定用アプリケーションでは圧電型加速度センサーが使われています。適切な製品を選択すれば、非常に低い振幅用途や、変位または速度への変換用として十分に強い信号を発生します。他の種類のセンサーと比較すると、加速度センサーは周波数や振幅では最も広いダイナミックレンジを持っています。ソリッドステートの加速度センサーは非常に頑丈で、かつ取扱いも簡単です。センサー内部のエレクトロニクスはケーブルに対する配慮を必要とせず、また豊富な出力やフィルターのオプションも備えています。

近接(渦電流)プローブは、DC(0Hz)までで強い低変位出力を生み出します。この製品ではノンコンタクトのデバイスで、回転シャフトと軸受ハウジング間における相対的な動きを測定できます。近接プローブは絶対振動測定には使用できず、高周波では制限があります。後付けなどの用途には不向きで、専用の適合ケーブルや駆動エレクトロニクスを必要とします。(図 4)

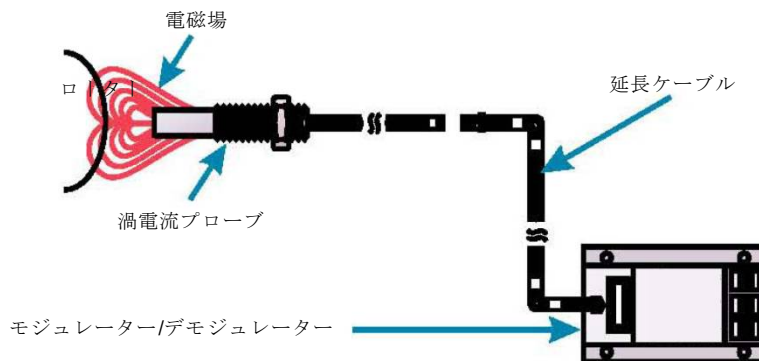


図 4 : 渦電流トランスデューサー

動電型速度センサーもまた低周波で強い出力を得ることができますが、センサーの固有周波数以下では感度がリニアではありません。通常 8~14Hz (480~840 CPM)の共振周波数以下では、信号はだんだんと減衰され感度が落ちていきます。動電型ピックアップは取付け方向に対して留意する必要があります、また劣化や疲労などに寄与する可動部品もあります。(図 5)

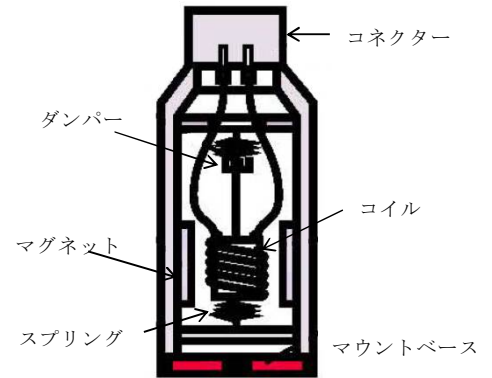


図 5：動電速度ピックアップの基本構造

圧電型トランスデューサー(PVT)は、内蔵積分機能をもった低周波加速度センサーです。動電型ピックアップと比較するとより広い周波数範囲をもっていますが(図 6)、通常の低周波加速度センサーほどには低周波または振幅を測定しません。低周波積分に必要なアンプのゲインが増加するため、フィルターコーナー周波数以下では PVT は通常 1.5Hz でフィルターされ、出力は減衰し感度は下がります。

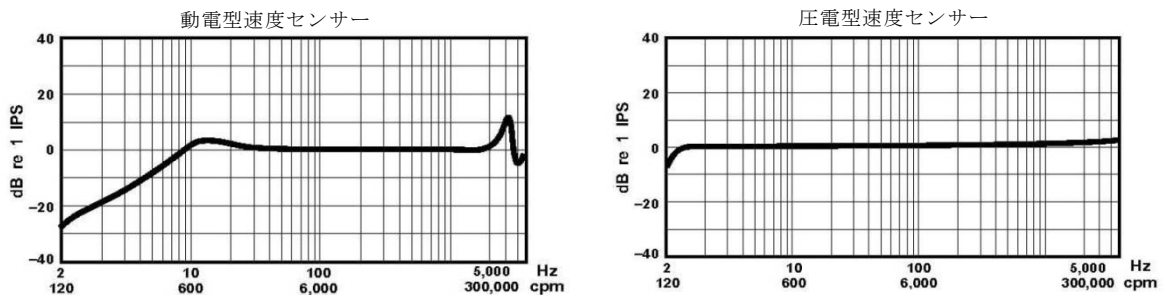


図 6：速度センサー応答特性の比較

PVT はモニタリング装置へ非常に強い電圧出力を出します。1.5Hz~12Hz (90~720 CPM)周波数バンドでは、100mV/ips の速度センサーは 500mV/g の加速度センサーよりも高い電圧出力を得られます。PVT は多くの低周波アプリケーションにおいてパフォーマンスを最適化します。参照1

システム選定基準

低周波センサーと測定装置には、周波数成分と振動振幅の情報が必要になります。センサーのローエンドフィルタリングや、監視装置をその用途に最適化するために最小周波数が決められます。機械振動のアラームレベルや低振幅測定で必要となることは、測定システムの電氣的ノイズ特性の基準で決められます。センサーの出力感度は監視装置への信号電圧を最適化できるよう選択します。その他のシステム特性は表 1 に示されている通りに評価します。

表 1：低周波システムにおける選択基準

選択項目	基準
周波数応答	機械の動作速度
振幅要求	アラームリミット
感度	データ収集範囲
ケーブル、電源、ほか	環境

低周波加速度センサー

低周波用加速度センサーは、電気ノイズを最小化し監視装置への電圧出力を最大化します。センシングエレメントには大きな振動質量によって駆動される圧電クリスタルを含んでいます。内蔵アンプはセンシングエレメントからの電荷信号をコンディショニングし、これを標準化された電圧出力として使用します。センシングエレメントからの電荷出力とアンプのデザインにより、電気ノイズや低周波応答が決まります。

図7a、b、cには一般的な低周波加速度センサーのデザインが示されています。圧縮型とシェアモード型加速度センサーは工業界でもっとも普及しており、ベンディング型は非常に壊れ易く特殊な地震用試験などに使われます。

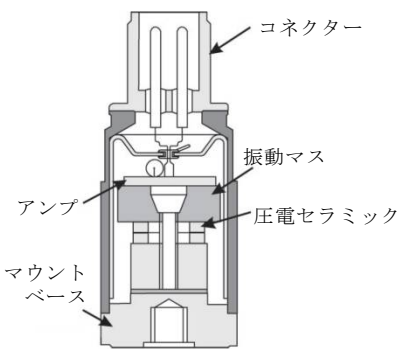


図 7a : 圧縮型デザイン

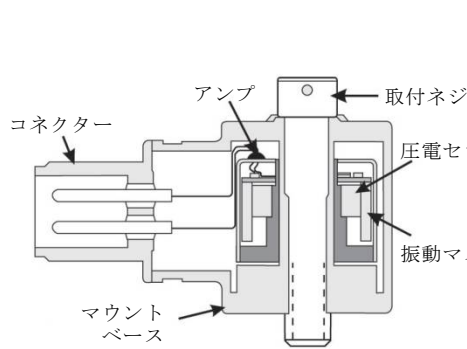


図 7b : シェア型デザイン

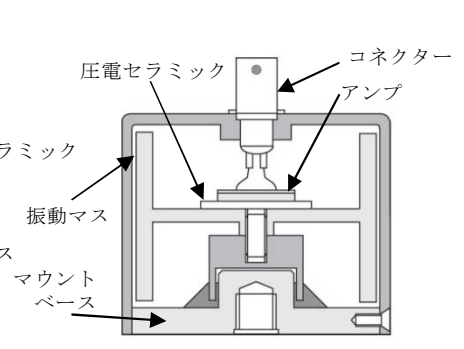
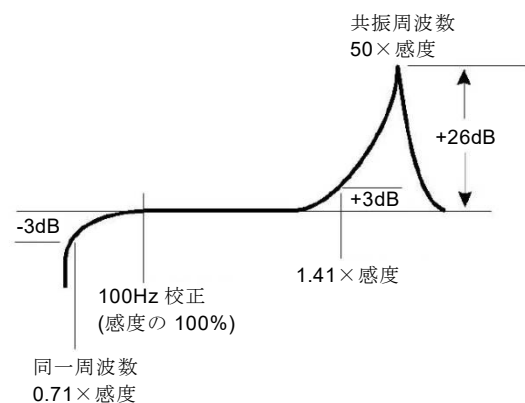


図 7c : ベンディング型デザイン

圧電式センサーはDC及びDC信号近辺の信号を取り除くためにハイパスフィルターを使っています。(図8) フィルターをかけることでセンサーハウジングの熱膨張による低周波過渡状態になることを防ぎます。フィルターコーナー周波数とは、校正された感度 (500mV/g、100mV/ipsなど)の71% (-3dB)まで減衰されたポイントですが、シングルポール・フィルターのコーナー周波数以下では、周波数が半分になる度に信号は半減します。2ポールフィルターを使用した場合、周波数が半分にカットされる度に1/4に低減されます。

低周波加速度センサーは単に応答だけでは選択できません。汎用センサーのフィルターの範囲を広げても低周波加速度センサーにはなりません。低周波用と銘打った多くのセンサーは、過度の電氣的ノイズがあるため低速の用途では使用できませんが、これはクォーツの加速度センサーで良く見られるケースです。



低周波加速度センサーは高周波過負荷になり易く、高周波信号を減衰するためにローパスフィルターをもっている場合もあります。高周波過負荷は機械的もしくは電氣的信号源によって引き起こされます。低周波加速度センサーは振動減衰やアンプの損傷を防ぐため過負荷保護回路をもっている必要があります。ケースによっては、高周波信号を除去するためにセンサーの下に機械的フィルターを置くことがあります。参照² 速度センサーは本質的に高周波でフィルターされており過負荷にはなりにくくなっています。

監視用装置

監視用装置の選択は応答及び電氣的ノイズという観点では似ています。信号入力的设计で監視の周波数応答が決まり、さらなる信号処理を考慮する上で影響が出ます。

多くの圧電型加速度センサーは、AC振動信号を伝えるためにDCバイアス電圧を出力します。AC振動信号を測定する前に装置でDCバイアス電圧を取り除く必要があります(図9)。DC信号を取り除くためにフィルタリングとディファレンシャル補正の2つタイプの入力回路が使われます。

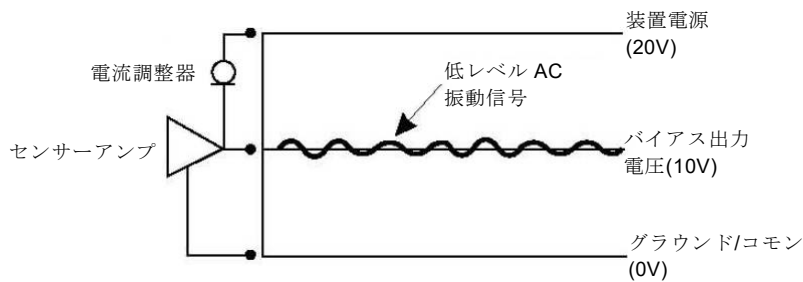


図9：DC バイアス電圧を取り除く

フィルターされた入力を使う場合、解析担当者はコーナー周波数とフィルターの極数を決める必要があります。そして装置とセンサーフィルターはシステムとして考慮されます。例えば、センサーを使用し装置、及び同じコーナー周波数を使用する場合、コーナー周波数で10mil P-Pの振動信号は5mil P-P (71%の71%=50%)の測定になります。特定のアプリケーションではアンプのエラーを補正するためにアラーム設定が必要となります。

多くの装置ではダイレクトカプル・ディファレンシャル入力を使い、ディファレンシャル入力はセンサーのバイアス出力電圧を読み取り、これを信号から減じます。これにより0Hzまでの測定ができ、低周波信号の減衰へのモニターの寄与を防止することができます。しかしながら、ディファレンシャル入力は加速度センサーの読み取りを加速度で処理する必要があります。データ収集におけるアナログ積分ではACカプリング(フィルタリング)を伴い、非常に低い周波数信号の減衰が起こります。ディファレンシャル入力を使った信号積分は、解析中にデジタルまたはソフトウェアで行えます。^{参照3}

アナログ積分を使う一つのメリットは高周波信号の固有減衰があります。これにより、測定装置のダイナミックレンジまでを使用することで高振幅、高周波信号を防ぐことにより低周波のSN比を改善できます。低周波応答と測定装置のノイズ間のトレードオフにより使われる積分方法が決まります。

システムノイズについて

SN比

低周波測定を行う際の最も重要な点は信号ノイズです。^{参照4} ノイズはスペクトルデータを見えなくし、振幅情報を変え、また測定を無効にします。積分された場合、低周波ノイズは増幅されよく知られるスキースロープ応答を生み出します。

低周波解析の第一法則は振動測定のSN比を最大化することです。振動信号は船が洋上に出ることと類似しており、海面レベルが測定のノイズフロアと同等の意味を持ちます。船が海面より高くなればなるほど、情報量が多く取れ水平線を簡単に把握できます。

第二法則は、もともと記録されていない信号を後処理では再現できないことです。⁵

信号ノイズは3つのソースの組み合わせに起因します：センサーの電氣的ノイズ、装置側の電氣的ノイズ、そ

して環境ノイズ(図9を参照)です。センサーの電気的ノイズは圧電センシングエレメントの出力変化とアンプのデザインに直接関係しています。装置ノイズは電気的設計、積分法、またセンサーへの電圧入力によって決まります。環境ノイズは外部ソースの様々な原因や、電気的、機械的特性に起因します。

センサーノイズ

すべてのアンプは、抵抗、ダイオードやトランジスターなど様々な電気的ノイズのソースをもっています。抵抗はジョンソン(ホワイト)ノイズを生み出しますが、Lo-Fiステレオシステムで良く知られるパチパチするノイズです。ジョンソンノイズは測定の高周波ノイズフロアを支配します。

トランジスターやその他のアクティブなデバイスはショットキーノイズ(1/f)を生み出しますが、ショットキーノイズは周波数が上がるにつれて増加し、図10に書かれているように低周波測定の制限要素となります。加速度センサーの低周波ノイズは回路のゲイン(アンプ)に比例し、圧電センシングエレメントの電荷感度に反比例します。^{6,7}

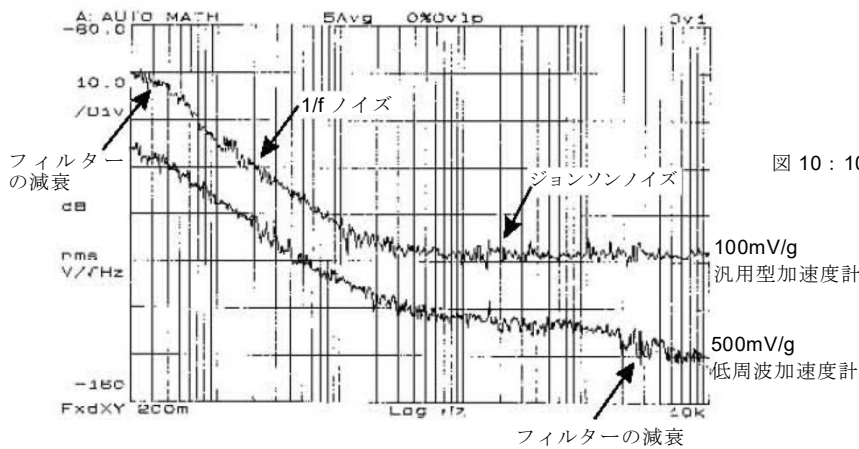


図 10 : 100mV/g と 500mV/g センサーのノイズプロット

電圧感度を上げるためにゲインを増やすと装置のノイズを下げることに繋がりますが、センサーでの SN 比は変化しません。船に例えに戻ると、船が運河に近付くと堰の水位が増えて波止場からは良く見えますが、水より上で船が見える部分は変わりません。

センシングエレメント(アンプ前段の出力)の電荷出力を増やすと、ゲインへの要求が下がり SN 比が上がります。電荷感度は振動質量を増やす、またはよりアクティブなセンシング材料を使うことでしか増加しません。低周波用途では、センシングアセンブリーの電荷感度を最大化されるために圧電セラミックを使用します。最近の圧電セラミック材は加速度センサー用途に特化して設計されています。PZT の電荷出力は表 2 にあるように、石英よりも 150 倍高くなっています。これにより圧電セラミック型センサーでは、工業用に求められる丈夫さや広い周波数範囲を確保しながら強い低振幅信号を得られます。低周波クォーツ加速度センサーには極めて大きな振動質量やベンディング型の採用が必要で、そのため非常に低い共振点や機械的な弱さがあります。

表 2 : 圧電材料の感度比較

圧電材料	フォース pC/N 単位の電荷比較
チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)	350.0
ニオブ酸リチウム	21.0
ポリフッ化ビニリデン(PVDF)	22.0
石英	2.2

装置ノイズ

装置側での電氣的デザインやダイナミックレンジの設定で、装置がシステムノイズに関係します。装置用部品は前述の通りジョンソンノイズやショットキーノイズを発生します。ダイナミックレンジにおいて考慮すべきことはセンサー出力と装置の処理に関する要求をマッチさせる点ですが、設定要素としては積分、解像度、及びアベレージングなどです。

モニタリング装置でのアナログの積分では通常低周波ノイズが増えSN比が下がります。低周波信号を増幅し高周波を減衰することにより集積回路が加速度を速度に変換します。低周波ゲインはまた、加速度センサーと装置両方の低周波ノイズを増幅かつ強調します。加速度から変位への2重積分ではより大きな増幅が必要で、より大きなノイズがあります。低周波ノイズの積分は主に「スキースロープ」データの要因です。

圧電速度トランスデューサー(PVT, 内部積分加速度センサー)や、より高い感度(500mV/g)の加速度センサーは、高圧出力がモニター入力になるため、飛躍的に低周波応答を改善します。より高い入力電圧はモニターノイズへの寄与を減らすことでSN比を改善します。PVTは、装置入力の前段における高周波信号を減衰することで、ダイナミックレンジにおいて追加改善をします。表3では、0.3ips振動一定で励振させた場合の様々なセンサーで等しくなる電圧が集計されており、図11ではグラフでセンサーを比較しています。

表3：変位、速度、加速度と振動センサー出力レベル

	1.5 Hz (90 CPM)	10 Hz (600 CPM)	100 Hz (6,000 CPM)	10,000 Hz (60,000 CPM)
変位 (mils)	32	5	0.5	0.5
速度(ips)	0.3	0.3	0.3	0.3
加速度 (g)	0.007	0.05	0.5	0.5
100 mV/g加速度センサー (V)	0.0007	0.005	0.05	0.5
100 mV/g加速度センサー(V)	0.0035	0.025	0.25	2.5
100 mV/ips圧電速度トランスデューサー(V)	0.03	0.03	0.03	0.03

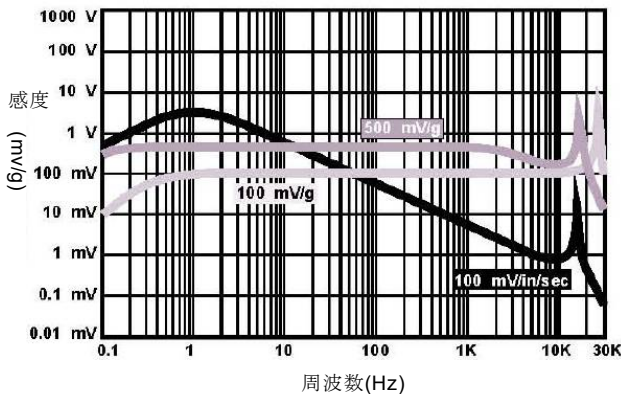


図 11：汎用、低周波、圧電速度トランスデューサーの周波数応答

より高い装置の解像度はスペクトル増幅ノイズを低減することで信号の信頼性を向上させます。電氣的増幅ノイズは本質的にランダムであるため、スペクトルのセンサーノイズは、指定されたバンド幅でのノイズのアベレージパワーを測定することによって決まります。スペクトルの増幅ノイズは測定された周波数バンドの電圧(または同等の単位)の平方根当たりで記述されます。周波数バンドに使用されるほとんどの仕様試験は1Hzで、解像度が上がりライン幅

(測定バンド)が1Hz以下の場合ノイズは減ります。⁸

例えば、センサーの仕様がスペクトルノイズ $2.0 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}@2 \text{ Hz}$ で、装置が $0\sim 10\text{Hz}(0\sim 600\text{CPM})$ で1,600ラインの解像度と設定された場合、ライン幅測定は：

$(10 \text{ Hz} - 0 \text{ Hz}) / 1,600 \text{ ライン} = 0.00625 \text{ Hz}$ または 0.375 CPM

センサーのスペクトルノイズの改善は：

$(2.0 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}})(0.00625 \text{ Hz})^{1/2} = 0.158 \mu\text{g}$

トレードオフは増えたデータ収集時間です。例が表4に示されています。

表4：0～10Hzバンド幅を使った解像度効果

解像度ライン	400	800	1,600	3,200
低周波センサーの電氣的スペクトルノイズ(1 µg/√Hz)	0.16 µg	0.08 µg	0.04 µg	0.02 µg
データセット当たりの測定時間	40秒	80秒	160秒	320秒
オーバーラップなし4アベレージの測定時間	160秒	320秒	640秒	1,280 秒
オーバーラップなし8アベレージの測定時間	320秒	640秒	1,280秒	2,560秒

ランダムノイズ信号をスムーズにすることで、増加したアベレージングでノイズは低くなります。時間とともにランダムノイズの寄与は低減され周期信号は強化されます。解像度が増えたときのように、上昇したアベレージングの欠点はデータ収集時間が長くなることです。トリガー周波数に対して高調波的に関連しないどのような信号をも除去することで、同期時間アベレージングはさらにSN比を上げます。

環境ノイズ

環境ノイズは、直接、間接に拘わらず測定に干渉する外部信号が原因となります。ノイズ源としては、試験下にある機械、機械の近辺、またはプラント機器、環境などから発生する電氣的または機械的な信号があります。極めて低い周波数振動の測定は、通常のモニタリングよりも環境ノイズに対して耐性をもっていません。

非直接的なノイズ源：高周波振動ノイズ

非直接的なノイズは高周波で発生し、測定システムと相互に影響し低周波干渉を生み出します。良くある例としてはポンプのキャビテーションや製紙ドライヤーカンの蒸気リーク、また圧縮エアーのリークなどがあります。これらの例では高振幅、高周波振動ノイズ(HFVN)を発生させ、センサーアンプが過負荷になり低周波歪みを生み出します。このタイプの干渉は一つの混変調歪みの形であり、良く知られる「ウォッシュオーバー」歪みとなり、これは普通過度のスキースロープと呼ばれます。⁹

ポンプキャビテーションはキャビテーションのバブルが壊れ HFVN を発生させます。図 12 のスペクトルでは 500mV/g 低周波加速度センサーを付けた同じポンプの測定を表しています。左側のプロットでは通常のポンプからの予測的な読み取りが示されており、右側のプロットではポンプのキャビテーションやウォッシュオーバーによるスキースロープが示されています。キャビテーションの過負荷により低周波信号が隠れることはありますが、これはポンプの劣化を示す信頼性の高い兆候であり診断として注視すべきと言えます。

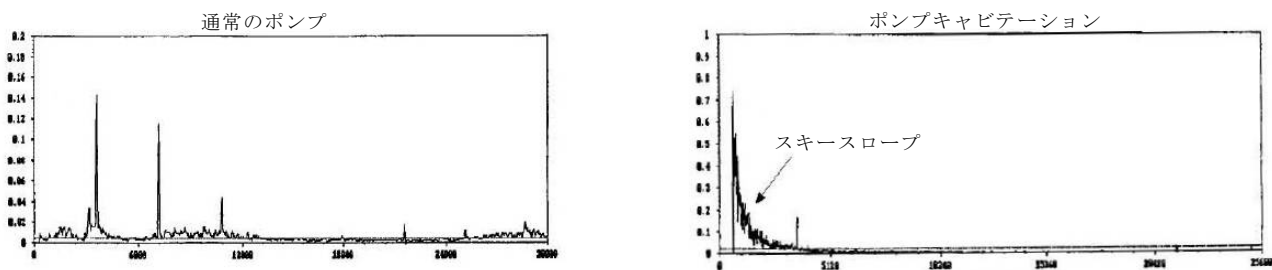


図12：高周波ポンプキャビテーションによる低周波センサーの過負荷

ガスリークはHFVNの他の原因として良く見られます。製紙機械は高圧シールが装着された蒸気熱乾燥器を持っています。シールリークが進行すると、蒸気の排気は高振幅ノイズを生み出します。キャビテーションに似ていますが、吹き出しは加速度センサーのアンプに低周波歪みを生み出させます。この場合実際の修理が必要

になります。

通常、低周波用加速度センサーは汎用加速度センサーよりのHFVNやウォッシュオーバーに弱いのですが、これは低い共振周波数と高感度によるものです。圧電トランスデューサーはHFVNを低減することによりウォッシュオーバー歪みを取り除いてくれます。

非直接的なノイズ：電氣的ノイズ

電磁放射や静電気放電などによる非直接的な電氣的な事象で、直接測定システムにノイズを発生させます。無線機器、放電線、または高圧コロナ放電を伴う機械などの近くにセンサーやケーブルが配置されると、低周波干渉が問題になります。適切に保護しなければ、低周波歪み成分を生み出すためにセンサーアンプは高周波信号を整流することがあります。センサーアンプがAMラジオ検知器のように動作するのを防ぐため、過負荷低減回路を使用することが非常に重要です。車のラジオでエンジンスピードに合わせて電波障害が上昇するトラブルを経験した人は多いはずで

直接的なノイズ源

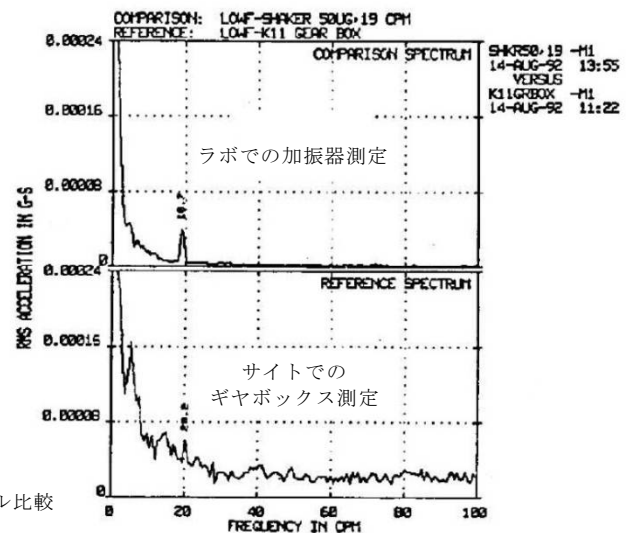
直接的な環境ノイズは測定範囲内における低周波機械的イベントで引き起こされます。主たるノイズ源には熱過渡を拾う場合や望まれていない低周波振動源からの干渉を含みます。

熱過渡はセンサーのハウジングの低周波膨張の原因となりますが、これはしばしば焦電効果と間違えられます。低周波膨張が起る結果、機械的歪み信号が圧電センシングエレメントに伝播します。熱過渡によるエラー信号に対する耐性は、センサーの歪み感度とフィルターのコーナー周波数に直接関係しています。低周波型加速度センサーは熱過渡の妨害を防ぐよう低歪み感度用に設計してあることが必要です。

近接する機械や装置からの直接的な振動ノイズは、多くのプラント環境において低周波測定に制限を設けます。低周波エネルギーはほとんどの構造物を經由して簡単に伝播します。非常に低い周波数では通過する車両ノイズでも測定干渉を起こします。ラボで使われるような先進ノイズアイソレーション構造であっても、交通機関などの影響を受けることがありますので、測定時間帯としては深夜が最適かも知れません。

図13のスペクトル比較では低周波測定における環境ノイズの影響を示しています。

図 13 : ラボ vs サイト測定のスเปクトル比較



500mV/gの加速度センサーと差動入力データ収集器を使用して、石鹼工場での攪拌ギヤ低減装置の振動測定をします。そうすれば低減装置の振動はラボにある低周波加振器でシミュレーションができます。出力シャフトの振動が0.32Hz (19 CPM)で2.4mil P-Pで、測定後ソフトウェアで変位へ積分されたとします。ラボとプラントでのスペクトルの比較では、プラント環境であるため明らかにノイズが増加します。この用途では装置とセンサーシステムのノイズは測定要素ではありません。¹⁰

実際の測定における留意点

測定時間について

低周波測定は本質的に時間がかかります。1つのアベレージを取るには、バンド幅によって分割された解像度の多くのラインと同じ時間がかかります。0~10Hz バンド幅での 1,600 ラインの測定解像度ではフルデータセ

ットに付き 160 秒かかります。この数値はアベレージの数や、全測定時間(表 3 を参照)を見つけるためオーバーラッピングを掛ける必要があります。データ収集時間を大幅に短縮するためオーバーラッピングは貴重なツールとなります。50%のオーバーラッピングでデータ品質を維持することができ、ほぼ半分に測定時間を短縮できます。¹¹

6~8 のアベレージ後、信号改善は無視できますが、現実的には解析作業者の忍耐に制限があると言えます。上記 10Hz バンド幅と解像度 1,600 ラインでの 6 つのアベレージで構成された攪拌測定では、自動レンジングと 50%オーバーラップで、測定時間は 11 分かかりました。¹⁰

低周波信号とノイズは振幅で変化し、自動レンジング時間を長くします。もしも可能ならば、ライブ時間表示を使って適切な範囲をマニュアル選択して下さい。マニュアルレンジングでは測定時間を短くでき、準同期データにおける信頼性を向上させます。¹²

オーダートラッキング

低周波用途ではオーダートラッキングの技術が求められます。低速の機械の場合多くは回転慣性がほとんどなく、経過時間により速度で変化します。この変化は低周波データを不鮮明にし、スペクトル解像度を著しく劣化させます。不鮮明さがライン幅よりも広い場合、解像度を上げスペクトルノイズを改善することで解消されます。

動作速度からのトリガーと周波数情報をオーダーに変換すればパワフルなツールになります。オーダートラッキングにより装置は速度変化と動作速度の高調波に追従します。ウォーターフォール図や非同期及び非調和信号と共に使用すればクリアーに認識することができます。

エンベロープ

エンベロープ技術ではベアリング不良に関する情報を抽出するため、ベアリングインパクトからの高周波振動ノイズを活用しています。抄紙機ロールからの繰り返し率情報やフェルト不良も検知できます。エンベロープ技術で一般的なものは、加速度と速度エンベローピング、振幅復調、スパイクスエネルギースペクトル、及びスペクトル放出エネルギー(SEE®)などがあります。これらの技術では、予め設定された高周波測定バンドを切り離すためにエンベロープフィルターが使われます。機械アSEMBリー内のメタル間コンタクトからの HFVNは、低周波フォールト信号ではキャリア周波数としての働きをもっています。エンベロープされたHFVNは不良を強調するために整流され、低周波情報だけを残すためフィルターされます。¹³

ターンオン時間と設定時間

ターンオンの時間と設定時間は多くの低周波用途では重要な要素になります。両方のケースにおいて、出力バイアス電圧を変えることは非常に高いレベルの低周波信号と解釈されます。信号を変化させることで自動レンジングを遅らせ、最初のスペクトルデータ格納に悪影響を与え重大なスキースロープを生み出すことがあります。¹⁴

ターンオン時間とはバイアス電圧が自身の最終静止点をパワーアップさせる時間で、低周波加速度センサーでは、デザインによりますが1から18秒となります。多重化電源システムではスペクトル劣化を防ぐために、データ収集の前にタイム遅延を活用していますが、連続電源供給の用途では問題とはなりません。

セトリング時間は見回り監視の用途ではより大きな問題となります。セトリング時間とはアンプのバイアス電圧がショック過負荷からリカバリーにかかる時間で、低周波用加速度センサーのリカバリー時間は2秒から5分もかかります。低周波でマグネットを使用する際にはもっとも顕著な問題です。過負荷保護回路付きのセンサーの場合、マウンティングショックからは、保護されていないセンサーよりも断然早くリカバリーできます。低周波センサーは高感度であるため、保護機能なしのアンプはショック過負荷による永久損傷のリスクが高い

と言えます。

マウント

低周波測定ではスタッドによるセンサーマウントを推奨します。マグネットやプローブチップを使用すると低周波でセンサーが動いてしまい測定が正確に行えません。またハンドヘルドの測定でもオペレーターやケーブルによる動きがあります。スタッドでのマウントではセンサーを強固に止めることができ、機械表面を経由する振動だけの測定が可能となります。ハンドヘルドではまた低い取付け共振がありHFVN歪みの影響を受けやすくなります。

低周波のアプリケーション

ベアリングのモニタリング

回転要素軸受は、抄紙機ローラー、攪拌機、また砕石装置など超低速度機械によく使われています。これらの装置では回転速度が0.2Hz(12CPM)などの低いものもあります。通常不具合周波数は高く、ほとんどはシステムの測定能力の範囲内です。しかしランニングスピードの1x、2x、及び3xの情報は、アンバランス、ミスアライメント、また弛緩などの診断では重要になります。装置側にはオーダートラッキングや同期時間アベレージング用途のための低速でのトリガー機能が要求されます。

並軸受はしばしば超低速機械に使用されています。大型スタンピング機に使われているクランク軸受は0.18Hz(11CPM)の低い周波数で使われます。ベアリングの劣化やクリアランスの増加により緩みが増えクランクスピードの2x で発生します。オイルホワールの不安定性振動はランニングスピードの0.42~0.48x で発生します。

ギヤの分数調波

ギヤのモニタリングは通常高周波用途と考えられていますが、ギヤメッシュ周波数以下のスペクトル情報に関する最近の研究では、ギヤメッシュの分数調波と歯車不良及び劣化には密接な関連性があると考えられます。回転軸受の不具合周波数のような低周波ギヤメッシュ分数調波は固有振動ではなく、欠陥や発達中の不具合が存在するところだけに見られます。不具合ギヤやピニオン歯車がお互いにコンタクトするため、分数調波メッシュ振動はハンチング歯の問題に関連しています。ハンチング歯周波数(f_{HT})は次の式で算出できます。

$$f_{HT} = (f_{GM})(N_A)(T_{GEAR})(T_{PINION})$$

ここでは、

f_{GM} = ギヤメッシュ周波数 (ピニオンギヤ x ギヤ歯)

N_A = ユニークアセンブリー一位相数

T_{GEAR} = ギヤ歯数

T_{PINION} = ピニオン歯数

ユニークアセンブリー一位相数(N_A)は、メッシュの各ギヤ歯数に共通の素数の積と等しくなります。ユニークアセンブリー一位相数(N_A)は、メッシュにある各ギヤ歯数に共通の素因数の積に等しくなります。¹⁵

例えば、18の歯をもつピニオンを仮定して、18の数は素数 $3 \times 3 \times 2$ の積です。また、30の歯をもつ相手歯車を仮定して、30の数は素数 $5 \times 3 \times 2$ の積です。例えば、歯数18のピニオンで、素因数の積が18では： $3 \times 3 \times 2$ となり、また相手歯車の歯数が30とすると、30は素因数 $5 \times 3 \times 2$ となります。ピニオンとギヤ間の共通素因数は2及び3；素因数(N_A)の積は6となります。減速しているギヤで入力駆動速度が15Hz (900 CPM)の場合、ギヤメッシュは450Hz (27,000 CPM)になります。

この例でのハンチング歯不良周波数は：

$$(15 \text{ Hz})(6)(30)(18) = 0.83 \text{ Hz} \text{ または } 50 \text{ CPM}$$

本当のハンチング歯ギヤセット用ハンチング歯周波数($N_A = 1$)は、ギヤ歯数でピニオン速度を割ったものです。(またはその逆、ギヤ速度/ T_{PINION})

クーリングタワー

クーリングタワーは発電所やプロセス工場などで広く使われていますが、モータードライブシャフトが減速ギヤのドライブファンに連結された構造になっています。水が通過し冷却される大型のベンチュリタワーの上ファンが置かれます(図14)。ギヤやブレードが原因となる壊滅的な不良は、製造ストップや高コストの修理になってしまいます。

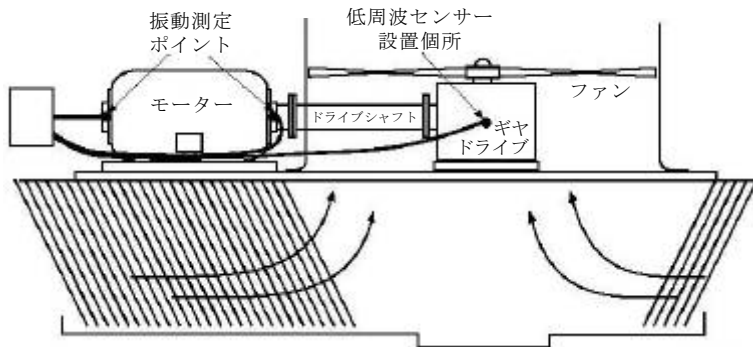


図 14 : クーリングタワーのクリティカルなセンサーポイント

従来のクーリングタワーのモニタリングは、振動スイッチまたはモーターの定期加速度試験で構成されています。振動スイッチは損傷を受けた機械をシャットダウンさせるためには極めて信頼性が低く、定期的測定は、モーターのベアリングや結合状態用には十分ですが、ギヤボックスやファンについての情報はほとんど得られません。能動的なクーリングタワーのモニタリングではギヤボックスに低周波用センサーを据え付けることが必要です¹⁶。

クーリングタワーでは永久設置のセンシングシステムで3つの難問があります。水分、腐食環境、超低速回転速度で、またサポート構造は強固さなども必要になります。¹⁷ ファンスピードは1x(アンバランス)及び2x(緩み)の固有振動数で1.5Hzから15Hzの範囲にあります。クラックなどのファン不良が進行すると翼通過周波数(通常は4x)で著しくなります。ファンの推奨振動上限値は9.5mil P-Pです。ファンスピードが2.5Hz(150 CPM)と仮定すると、1xのアラーム振幅ではほとんど速度は生み出されず(0.075ips)、加速度も低くなります(0.003g)¹⁸。ローノイズの500mV/gの圧電型加速度センサー、または低周波圧電速度トランスデューサーがほとんどの場合クーリングタワーの用途で推奨されます。

下の図15のプロットでは、低周波測定におけるセンサーと装置ノイズの影響が示されています。このスペクトルは鉄鋼業のクーリングタワーにおける複数のセンサーからのものです。ファンスピードは1.98Hz(118.69CPM)で0.02ipsまたは0.00065gの1x振幅となっています。

図15aのスペクトルは25mV/ipsの低周波圧電トランスデューサーで測定されたクーリングタワーの振動です。

スキースロープは以下の理由により見えません。

1. PVT (275 $\mu\text{ips}/\sqrt{\text{Hz}}$, S/N = 70)の低ノイズエレクトロニクス
2. 装置への (0.02 ips x 25 mV/ips = 0.5 V) 高圧出力
3. センサー内蔵のハイパスフィルター (-3 dB コーナー周波数 = 0.7 Hz (42 CPM))

図15bのスペクトルには500mV/g低周波圧電加速度センサーによって測定されたポイントと同じものが示されています。小さなスキースロープは次の理由で監視用装置によるものです。

1. 加速度センサーの低ノイズエレクトロニクス (2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, S/N = 325)
2. 装置への緩やかな電圧出力 (650 μg x 500 mV/g = 325 μV)

図15cの最下段のスペクトルには500mV/g低周波圧電加速度センサーによって測定されたポイントが示されています。より大きなスキースロープは次の理由でセンサーのアンプノイズによるものです。

1. クォーツセンサーのより高いエレクトロニクスノイズ (数値は不明)
2. 図15bと同じ装置への電圧出力

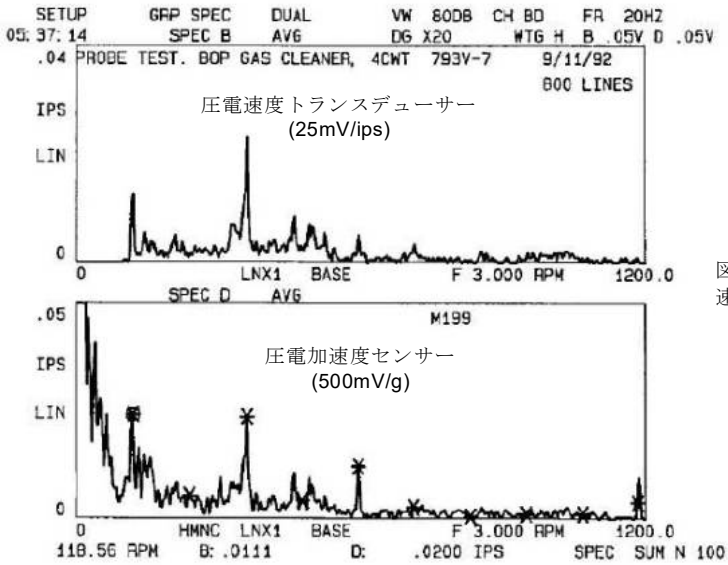


図 15a と 15b : 圧電トランスデューサー(上図)と圧電加速度センサー(下図)の低周波積分ノイズ比較

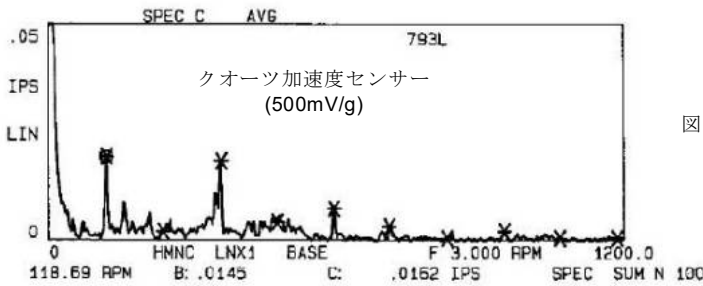


図 15C : クォーツ加速度センサーの低周波積分ノイズ

まとめ

低周波振動モニタリングには、振動測定装置の選定と使用に細心の注意が必要です。低速機械の低加速度振幅は通常装置や技術の限界を超えていることが多く、データ収集時間や努力を最大限活用するためには測定のSN比を改善する必要があります。

特定用途に設計された低周波圧電型センサーがほとんどの用途に推奨されます。圧電セラミックトランスデューサーでは、工業用途に求められる広い周波数と振幅範囲で優れたパフォーマンスが得られます。これらの製品は低ノイズエレクトロニクス、装置への高レベル出力、及び耐環境性を持っています。

測定機器は低周波入力キャパと十分なダイナミックレンジを持ったものを選択して下さい。適切な装置デザインと設定によりシステムノイズを低減しデータ収集時間を高速化できます。

低周波用途と技術はこれからも進化し新しく定義されていきます。低周波状態監視に向けたシステムチックなアプローチにより与えられたプログラムのゴールが見えてきます。

参照

- 1 Barrett, Richard, "Industrial Vibration Sensor Selection: Piezo-Velocity Transducers (PVT)", Proc. 17th annual meeting, Vibration institute, June 1993, p135-140
- 2 Schloss, Fred, "Accelerometer Overload", Sound & Vibration, January, 1989
- 3 Druif, Dave, "Extremely Low Frequency Measurement Techniques", Test Report, Computational Systems Incorporated, 1992
- 4 Grant, Douglas C., "Low Frequency Performance of Piezoelectric Accelerometers", Proc. 14th annual meeting, Vibration Institute, June 1990, p89-92
- 5 Technology for Energy, "Very Low Frequency Data Collection", TEC Trends, Jan/Feb 1993
- 6 Schloss, Fred, "Accelerometer Noise", Sound & Vibration, March 1993, p22-23
- 7 Robinson, James C.; LeVert, Francis E.; Mott, J.E.; "Vibration Data Acquisition of Low Speed Machinery (10 rpm) Using a Portable Data Collector and a Low Impedance Accelerometer", P/PM Technology, May/June 1992, p32-36
- 8 Judd, John E., "Sensor Noise Considerations in Low Frequency Machinery Vibration Measurements", P/PM Technology, May/June 1992, p26-30
- 9 Computational Systems, Inc., "Selection of Proper Sensors for Low Frequency Vibration Measurements", Noise & Vibration Control Worldwide, October 1988, p256
- 10 Seeber, Steve, "Low Frequency Measurement Techniques", MidAtlantic Infrared Services
- 11 Chandler, John K., "Overlap Averaging: A Practical Look", Sound & Vibration, May 1991, p24-29
- 12 Shreve, Dennis, "Special Considerations in Making Low Frequency Vibration Measurements", P/PM Technology, April 1993, p18-19
- 13 SKF Condition Monitoring, "Acceleration Enveloping in Paper Machines", Application Note CM3024-EN, April 1993
- 14 Robinson, James C. LeVert, Francis E.; Mott, J.E.; "The Acquisition of Vibration Data from Low-Speed Machinery", Sound & Vibration, May 1992, p22-28
- 15 Berry, James E., "Advanced Vibration Analysis Diagnostic & Corrective Techniques", Discussion of vibration diagnostic chart, Piedmont Chapter #14 of Vibration Institute, Technical Associates of Charlotte, Inc., May 27, 1993
- 16 Croix, Rick; Suarez, Steve; Crum, Coco; "Monitoring Systems for Cooling Tower and Process Cooler Fans", DataSignal Systems Technical Bulletin
- 17 Bernhard, D.L., "Cooling Tower Fan Vibration Monitoring", IRD Mechanalysis, Cooling Tower Institute 1986 Annual Meeting, January 1986
- 18 Murphy, Dan, "Cooling Tower Vibration Analysis", The Marley Cooling Tower Company, Maintenance Technology, July 1991, pp29-33

付録 - センサーセレクションで振動アラームレベルを使う

振動アラームレベルは、低周波測定装置により必要とされる振幅分解能の最小レベルを決めるために使用されます。アラームレベルはあらかじめ設定した周波数バンドにおける最大許容振動振幅と定義されます。アラーム以上で機械が動作することは不具合が極めて近いこととなります。

アラームバンドは対象となる機械の統計的な知見と経験を踏まえて決めるのが一般的です。^a 但し、多くの場合統計的な分析の代わりに簡素化したガイドラインが使われます。伝統的に振動アラームレベルは機械速度に関係なく速度で表されます。

工業界で標準の0.3ipsアラームは、軸受、ギヤ、その他多くの機械で長年使われて来ましたが、低周波で変位は破壊的な動きで優勢な表現方法だったので、このガイダンスは低速機械では不適切と言えます。

10Hz(600 CPM)以下で動作する機械には、低速9.5mil P-Pのアラームレベルが推奨されます。変位アラームは速度面として以下の式を使って正常化できます。^b

$$A_L = A_s (f_L / 600 \text{ CPM})$$

ここでは

A_L = 低周波アラームレベル

A_s = 標準アラームレベル (通常は 0.3 ips)

f_L = 測定対象の低周波ポイント、CPM

表Aでは速度、変位及びそれらのレベルで等しい加速度でのアラームレベルが表されています。

表A：標準アラームリミットでの振動振幅

周波数 CPM (Hz)	変位 mils peak-peak	速度アラームレベル ips	加速度 g
6 (0.1)	9.5	0.003	0.000005
12 (0.2)	9.5	0.006	0.000020
30 (0.5)	9.5	0.015	0.000120
60 (1.0)	9.5	0.03	0.000490
90 (1.5)	9.5	0.045	0.0011
120 (2.0)	9.5	0.06	0.002
300 (5.0)	9.5	0.15	0.012
600 (10)	9.5	0.3	0.050
1,800 (30)	3.2	0.3	0.150
3,600 (60)	1.6	0.3	0.2
7,200 (120)	0.80	0.3	0.5
60,000 (1,000)	0.095	0.3	5.0

この表はセンサーや測定システムの、絶対最小低レベル測定キャパを決める際に使用できます。

ほとんどの解析担当者はアラームのはるか前にトレンドデータを必要とすることははっきりしており、センサーの選択は用途別の個別要求に基づくべきであると言えます。

注：

a Wetzel, Richard L., "Statistical Alarm Methods", P/PM Technology, 1990

b Berry, James E., P.E., "Required Vibration Analysis Techniques and Instrumentation on Low Speed Machines Particularity 30 to 300 RPM Machinery", 2nd Edition, Technical Associates of Charlotte, Inc., 1992, p. 46-47