

# ラボでの振動に関する検討事項 振動現場調査 - 必要な装置の選択

## VIBRATION CONSIDERATIONS IN LABORATORIES

### Vibration Site Surveys – What they tell you about your equipment needs

かつて「知覚していることが現実である」と言った人がいました。しかし、実験対象が小さな振動にも敏感であるため、真夜中に実験データを取得せざるを得ない科学者やエンジニアであれば、全く別のことを言うでしょう。現実には、知覚できない振動が繊細な実験に影響を与えることが可能であり、また、実際に影響を与えます。そのため、光源を特定し、適切な装置を選択してその悪影響を最小限に抑えることが重要です。

ラボではさまざまな振動に敏感な装置が置かれ、レーザーをベースとした研究、高分解能イメージング、半導体の製造およびバイオテクノロジーなどの分野における研究や製造に使用されています。電気プローブを生細胞の原子核に挿入する、ナノ構造のサブミクロン単位の線をエッチングする、または新しい材料のSEMイメージを取得するような場合、ラボ環境の振動レベルを人間が知覚可能なしきい値より十分に低いレベルとする必要があります。装置の底面が置かれた床が振動すると、イメージング用コンポーネント、試料、レーザーまたは基盤が互いに相対して動き、イメージがぼやけ、イメージの量も減り、誤った結果が得られます。この相対的な動きがどの程度結果に影響するかは、環境的な振動の振幅および周波数の他に、実験装置の感度にも依存します。

周囲振動はどこにでも存在し、2つの発生源のグループ（内部発生源と外部発生源）に分けることができます。図1は多くの一般的な振動発生源を示しています。振動の内部発生源として多いものは、歩行によるもの、空気処理システムの流動励起、バランスを失ったファン、真空ポンプ、チラー、およびその他の操作用ラボ装置および機器などです。これらの内部発生源は一般的に外部発生源よりも高いレベルの振動を発生させます。外部のノイズ発生源は、ビルの構造自体に組み込まれるものであり、エレベータ、HVACモータ、車両や鉄道の走行によるもの、建設活動および付近の重機産業（機械工場など）などがあります。通常、空港は著しいレベルの低周波数振動ノイズも発生します。これらの発生源および構造物に対して測定者がラボのどこにいるかによっても、ラボのノイズレベルに影響があります。複数階のビルの上階にラボと装置がある場合、ビルの揺れや構造的な共振にさらされる場合があります。エレベータの

動きもまた、荷積み用ドックやオーバーヘッドドアと同様に低周波数振動ノイズの原因となります。前述のようにこれらの振動は人間の知覚可能な閾値より低いかもしれませんが、それでも実験または処理結果に影響を与えます。振動の発生源を理解し、これらの影響を定量化することが、高精度なシステムを構築するための最初のステップです。ラボの振動を測定する最も一般的な方法は、基本的な現場調査によるものです。



図1: ノイズおよび振動の一般的な発生源

現場調査では複数地点の床を測定し、垂直方向と水平方向の両方で、ラボ振動の周波数規模を測定します。また、空気処理評価や音響測定も含み、筐体やビーム保護の必要性を定量化します。その後、この調査データはこれらの振動を受け入れ可能なレベルに低減するために必要な振動制御装置の種類を決定する目的のために使用されます。もちろん、適切な装置を用いた実験を行ってデータを分析することが、適切な装置を選択し、保護に必要な以上の費用をかけないためにも不可欠です。

ラボ現場調査を行うために使用する装置には、超低ノイズトランスデューサーおよびアナライザなどがあります。これらの装置はサブミクロンレベルまで測定可能であり、1 Hzから500 Hz以上に広がるサブミクロン帯の振動および共振における物理的な振動を測定するために十分に広いダイナミックレンジを有します。測定に使用されることが多い機器は、以下のとおりです。

- 動的シグナルアナライザ - 2チャンネル、携帯型、リアルタイムFFTアナライザ

- 超低ノイズ地震加速度計および増幅器（測定範囲0.05~500 Hz、サブミクロン振幅が測定可能）

- USBインターフェース付ラップトップコンピュータ

これらのツールを使用して、3分の1オクターブバンドとPSD（パワースペクトル密度）プロットの2つの重要な性能グラフを作るために必要なデータを生成します。

### 3分の1オクターブバンドとPSD

環境（床）振動基準曲線は、個別システムからのデータと、振動問題を解決する前と後での施設での測定結果に基づいて作成されました。さらに、経験のある優れた振動コンサルタントたちにより半導体製造業界で20年近く幅広く使用され、この業界が狭線幅に移動するに従って、この基準曲線も拡張され、改良されてきました。この基準は、さまざまな活動および装置に受け入れ可能な振動レベルのガイドラインを定義する「3分の1オクターブバンド速度スペクトル」のセットとして規定されます。これらの基準曲線の主な利点のひとつは、変位または加速度の単位の代わりに、速度の二乗平均平方根を単位として表す点です。さまざまな研究により、個別の装置は異なる周波数に対し固有の変位応答を示し、これらの地点は多くの場合等速曲線上に存在することがわかっています。さらに、各クラスに属する装置の性能に影響を与える等速閾値がかなり一定であるという傾向があります。

製造および研究開発における床振動は、個別周波数からなる純粋な音エネルギーとは対照的に、一般にランダムな「広帯域」エネルギーに支配されています。システムの共振は広帯域振動と純粋な音振動の両方により励起されますが、励起される程度は異なります。ランダム振動はラボと測定施設で観察された床振動の測定値に非常に近いため、ランダム振動を基にした仕様の方が、実際のアプリケーションをより正確に反映します。現場の評価と、多くの新しい設備の設計目標により、「3分の1オクターブ」振動基準が代表的な環境振動スペクトルを正確に反映することが確認されています。表1は基準曲線/環境評価レベルを詳細寸法とアプリケーションの関数として表します。

剛性を持たせるため、各モジュールは隣接モジュールの上端と下端に沿って取り付けられた加工済みの箱形断面スチールの接合アダプタにより連結されています。モジュールのアセンブリ手順は2名の作業員により容易に行うことができます。

単一パネル型テーブルに対するテーブル型モジュールの重要な強みのひとつは、アセンブリ現場への輸送が楽であるという点です。従来のテーブルパネルはサイズが大きく、重機の使用や、出入り口を広げる、壁を壊すなどの特別な施設の改修が必要な場合が多くありました。モジュールはこれとは異なり、標準的な出入り口に容易に適合し、ビルのエレベータで運ぶことができます。

各接合アダプタにある貫通孔は、ケーブル、冷却線、レーザービームの経路を作るために使用でき、その方法は単純に上部プレートに穴を加工するだけです。接合アダプタにはネジ穴も開いているので、レーザー用テーブルやその他の装置の下棚への取り付けが容易です。サイドパネルにはネジ穴が配列されており、装置をモジュールの側面に取り付ける際に便利です。

図2は3分の1オクターブバンドとPSDプロットのサンプルであり、一般的なラボでの現場調査で取得したデータを示しています。PSD測定からラボに明確な共振があることがわかる一方、3分の1オクターブ速度プロットは測定したラボ環境をさまざまな活動や装置によって許容可能な振動レベルに一致することを可能にします。たとえば、図2の左側にある3分の1オクターブプロットの測定地点では、8 Hz帯で700 micro-inch/sの振動があり、これは言い換えるとVC-B環境となります。この環境

表1：3分の1オクターブ基準曲線/環境評価

基準曲線	最高レベル <sup>(1)</sup> µin./sec. (dB)	詳細寸法 (µ-in)	用途
工場 (ISO)	32,000 (90)	不明	はっきりと感じられる振動。工場および敏感でない区域に適用。
オフィス (ISO)	16,000 (84)	不明	体感される振動。オフィスおよび敏感でない区域に適用。
日中の住宅 (ISO)	8000 (74)	75	ほとんど体感されない振動。ほとんどの場合の睡眠区域に適用。コンピュータ装置、プローブ試験装置および低倍率 (20倍以下) の顕微鏡には十分と考えられる。
使用中の劇場 (ISO)	4000 (72)	25	振動が感じられない。敏感な睡眠区域に適切。ほとんどの場合、100倍以内の顕微鏡その他の低感度の装置に適切。
VC-A	2000 (66)	8	ほとんどの場合、400倍以下の光学顕微鏡、マイクロバランス、オプティカルバランス、近接及び投射アライナーなどには十分。
VC-B	1000 (60)	3	1000倍以下の光学顕微鏡、線幅0.3µ-inの集積回路用検査およびリソグラフィ装置 (ステッパを含む) に適切な基準。
VC-C	500 (54)	1	詳細寸法1µ-inのほとんどの検査およびリソグラフィ装置には良好な基準。
VC-D	250 (48)	0.3	ほとんどの場合、電子顕微鏡 (TEMおよびSEM) 及び電子ビームシステムを含む最も要求の厳しい装置の能力の限界までの操作に適切。
VC-E	125 (42)	0.1	ほとんどの場合に達成困難な基準。光路長が長く、小ターゲットのレーザー使用システムその他の、最も厳しい要求に十分であると想定される。

この表に記載の情報は、あくまでも指針となります。多くの場合、アプリケーションや、装置とプロセスの振動によって異なります。

<sup>1</sup> 8~100 Hzの周波数帯で3分の1オクターブバンドの周波数を測定した場合、dBの尺度は1 マイクロインチ/秒を基準としています。  
<sup>2</sup> 詳細寸法とは、マイクロエレクトロニクス製造の線幅、医療および薬学研究の粒子 (細胞) 寸法などを指します。ここで与えられた値は、多くの項目の振動要件がプロセスの詳細寸法に依存することを考慮して観察しています。

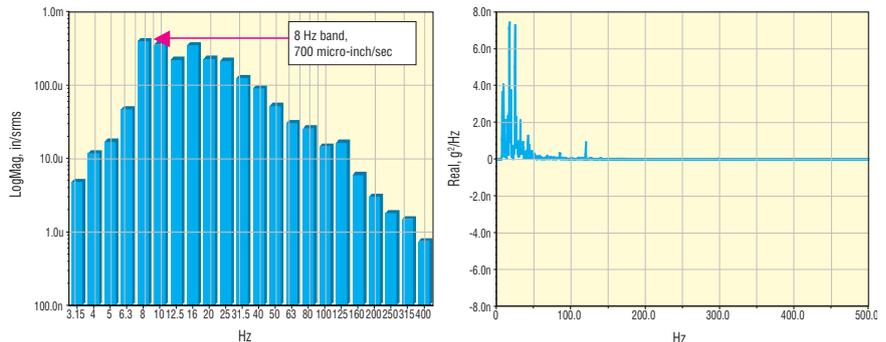


図2：一般的な研究用ラボの現場調査から取得した3分の1オクターブとPSDデータのサンプル。

では、振動を感じることは非常に困難であり、55 dBのノイズが存在する可能性があります。このVC-B環境では標準的な倍率1000倍の顕微鏡を効果的に使用することができます。また、振動制御製品の使用は最小限で、3ミクロン単位の特性寸法を有する他のアプリケーションでも使用できます。

しかし、お客様のアプリケーションが0.1ミクロン (VC-E) の特性寸法で操作する必要があれば、この種の測定を行える環境を達成するには振動制御装置が必要となります。この場合、床からテーブルトップまでの振動を減衰するため、振動アイソレータが必要です。

必要なアイソレータの種類は、3分の1オクターブ現場調査プロットと、そのアイソレータの伝達性に依存します。振動レベルがアイソレータの摩擦限界を超えることを条件として、伝達曲線から所定の周波数における振動減衰量がわかります。

振動の分離は、ばね、ゴム製のパッド、空気を充填した袋、空気圧式セルフレベリングアイソレーション区間または圧電素子や導電素子を使用したアクティブアイソレーションシステムを通じて達成できますが、能力、性能、そして当然ながら価格のレベルはそれぞれ異なります。

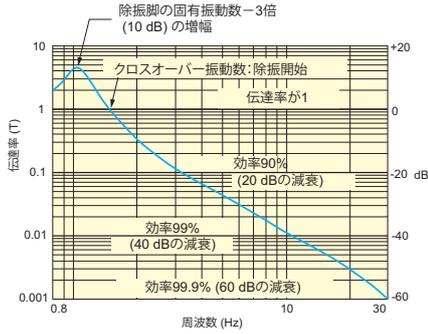


図3: 代表的な振動伝達プロットの表示

ほとんどの場合、アイソレーション性能はノイズの低減量 (dB) または特定の周波数領域でのアイソレータの性能を表す伝達プロットにより測定します。空気圧式アイソレータの伝達プロットのサンプルを図3に示します。

周波数0 Hzのとき、曲線は単位 (または0 dB) 振動伝達性から始まります。言い換えると、非常に低い周波数ではアイソレーション区間は基本的に固定されており、振動振幅はテーブルトップに正確に伝わります。曲線は1~2 Hzで上昇し始め、ピークに達します。これがアイソレータの自然周波数です。プロット上で曲線が単位伝達率を超える場所では、アイソレータが振動レベルをテーブルに到達する前に高めます。ピークはアイソレータ設計の最大振幅を表します。軽度で減衰したアイソレータは、高く鋭いピークを示し、高度に減衰したアイソレータは、図4で示すとおり振幅の小さい丸みを帯びたピークを示します。当然ながら、アイソレータの減衰は共振の振幅に影響を与えるだけではなく、次に示すように、高周波数でのアイソレータの効率にも影響を与えます。

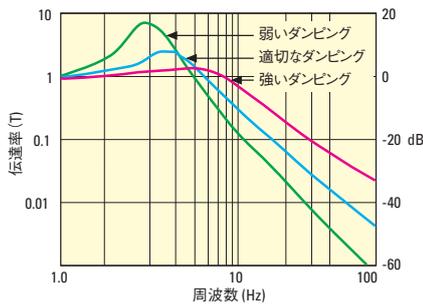


図4: アイソレータの伝達性プロット

ほとんどの光学テーブルの自然周波数では、アイソレータの振動は3倍から4倍 (10~12 dB) に増幅されます。周波数がアイソレータの共振を超えて増加すると、伝達性は急激に低下し始めます。アイソレータの伝達曲線が単位伝達率以下に下がると、「アイソレーション」が始まります。曲線が急激に下降すると、ローパスメカニカルフィルタの効率がますます高くなります。10 Hz付近、高品質空気圧式アイソレータは床振動の95%以上をフィルタリングします。100 Hz付近では、振動の約99%がフィルタリングされます。

**上図2で示した例に戻る - 適切な装置の選択。**

図2の3分の1オクターブ速度プロットは、8 Hz帯で700マイクロインチ/秒の振動のあるVC-B環境を示しています。この環境は0.1ミクロンの特性寸法での作業に適しているでしょうか? 空気圧式アイソレータは0.1ミクロンまでの特性寸法での作業を可能にする、十分なアイソレーションを提供するでしょうか? これらの質問に答えるには、3分の1オクターブ速度プロットと併せて使用される伝達曲線が有効です。この伝達曲線を用い、減衰

を周波数の関数として計算することができます。図5で改めて高品質空気圧式アイソレータの伝達曲線を示しています。8 Hzでは、アイソレータの効率は約96%です。3分の1オクターブプロットから取得した8 Hzのピークは28マイクロインチ/秒に減衰され、VC-Eより十分に低い環境を提供します。表1の振動基準曲線によると、VC-E環境は要求の厳しい振動感度の高いシステムの多くで適しています。これは、光路長の長い、レーザーベースの対象物が小さいシステムや他のシステムを含みます。この場合、共振が室内にある状態でも、NewportのS-2000スタビライザシリーズのような高品質空気圧式アイソレータが極めて安定した環境を作り出し、共振影響を打ち消すことができます。この種の環境では高価な圧電型アイソレータや電子アイソレーション装置は必要ありません。これらの装置は高性能ですが、コストに見合う効果はありません。

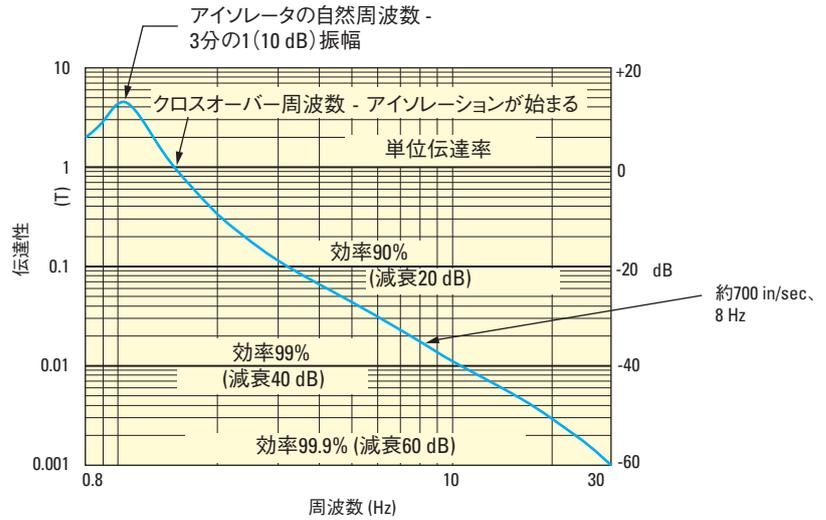


図5: 代表的な振動伝達性プロットに3分の1オクターブのピークを重ね、特定の周波数で提供される減衰量を決定します。

以上をまとめると、特定のアプリケーションに必要な振動の低減量は、環境およびそのアプリケーションにおける実際の要素の測定分析を通じて決定することが理想的です。これには、低ノイズ地震加速度計や、場合によってはレーザードップラー振動計を用いる非接触型振動分析を用いた振動現場調査を含みます。後者は高価ですが適時処理を行え、最も精密かつ要求が厳しいアプリケーション（半導体ウエハ製造、干渉分光法、ホログラフィなど）に最適です。通常、これらのアプリケーションには少なくとも空気圧式アイソレータシステムと高度に減衰した光学テーブルが必要です。場合によっては、アクティブアイソレーションシステムや積極的に減衰したテーブルが

必要な場合があります。これは、振動がそれぞれ床やテーブル面から発生するものであるか、またこれらの振動がどの程度の規模であるかによります。

電子顕微鏡、多光子顕微鏡およびレーザーマイクロマシーニングなどの振動感度が中程度のアプリケーションに対するより一般的で経済的なソリューションは、Newport社などの振動制御装置の専門家に相談し、現場調査を最終システム構成の前に実施できるかどうか決定してもらう方法があります。上述のとおり、基本的な現場調査は、ラボの一般的なノイズレベルを決定し、購入する予定の製品が必要な振動低減を行えるかどうかを検証するために有効です。通

常の現場調査には、複数地点の床を垂直方向と水平方向の両方の3分の1オクターブ速度およびPSDプロットで測定し、それと共に音響測定を行って筐体やビーム保護が必要かどうかを定量的に確認し、アプリケーションのニーズに合わせた推奨装置と結論を含む、詳細な分析レポートが含まれます。現場調査レポートに含まれる装置の推薦は、現場調査の間に見つかった水平方向と垂直方向の両方の振幅と共振データに基づくだけでなく、これらの振動によるお客様のアプリケーションへの影響を考慮しなくてはなりません。

**Laser Focus World** (Copyright 2010 by PennWell Corporation) 2010年6月号から改訂・転載