

「測定環境の創造」

(1) ナノテク時代を迎えた振動対策

はじめに

ナノテクノロジーやバイオテクノロジーに代表される超微細技術による「観察・検査・加工・操作など」を維持するための周辺技術として、防振を含む幾つかの「測定環境」の重要性の認識がますます深まっています。ナノの技術領域は、原子1個（直径0.1ナノ）から数百個分位の単位でもものを操作したり加工したりする技術です。バイオの技術領域は、DNA（デオキシリボ核酸）の直径が2ナノといわれ、次世代半導体デバイス寸法の開発目標が、現在の130ナノから45ナノまで縮小したところにおかれており、本格的なナノテク時代の到来といえます。測定環境を確保する対策として振動や騒音・電界と磁界の波である電磁波・静電気やその他の電気ノイズ・埃や塵・温度や湿度・不必要な可視光・空気対流や熱対流・酸化など化学的な影響などナノメートルの世界を取り扱う上での有害な要因に対しては、1つ1つ地道な対応をしていくことは言うまでもありません。特に、基本的有害要因の一つである「振動」について述べると、最近の防振技術は、従来からの「パッシブ型」に新しい「アクティブ型」が加わることによって、防振の環境やその能力が大きく変貌を遂げようとしています。私たちの身の回りには、「振動や震動」、「制振や制動」、「防振や除振」、「耐震や免震」などその概念や違いなどが不鮮明でわかりにくくなっていますので、振動対策に関連する用語をわかりやすく整理しながら、合わせてアクティブ型を含む防振の最新現場情報をご紹介します。

1 振動の概要と防振技術の最新情報

1-1 人間の営み（自然界・人工界）と防振

人間は、太古から今日まで自然界の多くの事象に対して積極的に働きかけてきました。この点が他の動物と根本的に異なるところです。時には自然界にあるものをそのまま採取・狩猟もしますが、物を作り出す積極的な働きかけ（生産行為）によって、人間としての能力が飛躍的に進歩し成長しました。さらに生活を営む中で、自然界の風や波などの猛威に対する備えとして防波堤や防風林を築き、外敵から身を守る防衛・防備を行い、寒さから身を守る防寒用具、有害菌類などの解毒や防毒（最近では抗菌・除菌として）に至るさまざまな働きかけと知恵を身につけてきました。

現代社会では、さらに半導体を中心とする高度な防塵（クリーンルーム化）や気体（空気）振動としての縦波（P波）や液体及び固体内に伝搬し変換される横波（S波）などの音圧や影響を防ぐ防音対策、有害電磁波ノイズの防磁遮へい、さらには自然界で最も恐ろしい自然現象の1つである地震動による震動への対策（免震・耐震）や人工的・機械的な諸振動を防ぐ「振動対策＝防振」の必要性があらゆる局面で増加しています。

1-2 「防振」と「除振」の2つの用語使用とその背景

今日では、精密防振や除振の方式を指す世界的な用語として、パッシブ（passive：受動性の、受け身の、消極的な、アクティブの反意語）とアクティブ（active：能動性の、活動的な、活発な、積極的な、パッシブの反意語）の2つに分類し使用されています。このことから、従来の「防振と除振の概念や用語説明」が意味不明なものになっています。かつては、振動源自体を直接的に積極的に防止することを「防振」と称し、振動源から伝播してくる振動を間接的に消極的に防止することを「除振」と称してパッシブ型を細分化していた時期があります。今日では、電子制御の新しい手法を取り入れたアクティブ型が新たに加わってきたことから、従来の区分でパッシブの概念や用語を論じアクティブと対比することが不可能になっています。例えば「アクティブ除振」という用語が従来の概念で当てはめると「積極的な消極的な」意味になり「パッシブ防振」という用語が「消極的な積極的な」と何とも滑稽な意味になってしまいます。今後はかかる用語で混乱させないためにも、従来の用語概念を取り払い、基本的には両者を同意語として使用する必要があります。両者の概念は別として、既に各社で長年にわたって各々の用語を使用してきた経緯があるために統一することは不可能です。

1-3 震動と振動には違いがある

時として多くの大災害を引き起こす直下型地震は、阪神・淡路島地震による阪神大震災として、今でも私たちの脳裏に強烈に残っています。火山爆発でも衝撃波や地震を伴います。私たちの身の回りには、だれでも感じ取れるような交通振動や機械振動・ビルの建設や道路工事振動ばかりではなく、歩行時の振動やドアの開閉振動・空調機の運転振動・エレベータの昇降振動などから伝搬してくる様々な振動があります。自然発生的に突然起きる地震時の震動と人工的機械的振動は、その源に起因する現象や文字で容易に判断することができます。そして「振動」と「震動」が各々扱う単位や分野がマイクロとマクロの差であることを知ることも出来ます。

1-4 振動を構成する4つの要素(成分)

振動を構成する要素には、振動周波数 F (Frequency)・振動加速度 A (Acceleration)・振動速度 V (Velocity)・振動変位 D (Displacement) の4要素(成分)があり、これらが互いに密接な関係によって成り立っています。数学的には、速度の微分が加速度であり、加速度の2回積分及び速度の積分が変位になります。簡略式中の $2\pi f$ は、角振動数です。振動加速度 A(Acceleration) 1 Gal は、私たちが通常耳にする重力加速度 G ($1 G = 9.8m/s^2$) のおおむね $1/1000$ の小さな値です。現実問題としてナノテクノロジーを例にとると、ナノ ($1 nm = 1/1000 \mu m = 1/1000000 mm = 1/1000000000 m$) という分子や原子など超微細な世界を相手にして観察し、加工・検査・制御することになります。この環境での許容できる外乱振動は、1gal (敏感な人が指先などで感じる振動加速度の大きさは、0.8~1.2 gal 程度です。) という小さな値からさらに $1/100$ gal、 $1/1000$ gal などと極小な値に減少(振動減衰)させなければなりません。もはやパッシブ型の限界点を過ぎてアクティブ型の限界点を目指す勢いです。あと何十年か先には、さらに極小なフェムトやピコなどの接頭語や単位系が日常的に使われているかも知れません。

1-5 振動に関する簡単な関係式

重力加速度 G と振動加速度の呼称単位 gal との関係及び振動の4要素(成分)相互の関係を以下にまとめてみます。変位や加速度の単位にご注意ください。

【 G と gal の関係 】

$$1 G = 9.8m/s^2 = 980 cm/s^2$$

$$1 cm/s^2 = 1 gal \quad 1 G = \text{約 } 1000 gal$$

【 簡略関係式 】

$$A = (2\pi f)^2 \times D \quad \text{単位: } cm/s^2$$

$$V = (2\pi f) \times D \quad \text{単位: } cm/s$$

$$D = \frac{A}{(2\pi f)^2} \quad \text{単位: } cm$$

$$D = \frac{250 \times A}{f^2} \quad \text{単位: } \mu m$$

$$f = \sqrt{\frac{250A}{D}} \quad \text{単位: } Hz \quad \text{但し } D \text{ は } \mu m$$

1-6 「顧客や装置メーカーが考える振動」と「防振台メーカーが必要とする振動成分(振動要素)」

当社にもたらされる最も多いデータや問い合わせが振動変位であり、次いで振動加速度、ときに輸入商社経由での振動速度の順位となっています。いずれのデータにおいても、振動が周波数に大きく依存していますので、振動周波数との対比で各振動を捉えなければなりません。精密機器や超精密機器といわれるものの95%以上は、振動加速度によって大きな影響を受けていますので、振動加速度と振動周波数との関係が重要になります。残りの5%未満は、例えば直示型天秤などのように「貢かんの傾き角度が秤量として表される機器」が該当し、振動変位と振動周波数との関係が重要になっています。但し大抵の場合には、同一面上での等速直線運動や等速円運動時の速度が如何に速くとも、単位時間当たりの急激な速度変化(各種の車両の急発進・急ブレーキなど加速度の増加又は減少)が無ければ、バスや電車に乗っていてよるける事も不快に感じる事もありません。単位時間あたりの速度変化(つまり加速度)が物体に及ぼす影響の度合いが大きいことを私たちは体感しています。この不快な現象は、「精密機器や超精密機器」の場合は、データの再現性やときには測定エラーとなって不快感を表現します。「精密機器や超精密機器」と「人間」が合い通じる唯一の部分ではないでしょうか？

1-7 人間の固有振動数は？

全ての物質には、それ自身が持っている固有の振動モード（振動数）があり、同一の周波数的影響を受けると共振現象を引き起こします。音叉や弦楽器・打楽器・お寺の釣鐘・糸電話・などは、この現象を逆利用したところに価値があります。人間の胸から腹部は、垂直V方向（縦方向）で4～8Hzあたりに、また水平H方向（横方向）で1～2Hzあたりに固有振動数をもっていることが判明しています。人間を加振台上に固定して、加振器（シェーカー）で加振させた実験結果が報告されています。加振実験は、装置など構造物のモードを試験したり、各種防振台の評価を求めたりする場合に行いますが、人間自身を加振させるとは何とものすごいことです。大きなうねりのある外洋に出かけて、船酔いを起こすのはこの固有振動数が原因であると考えられています。又、昨今で新たな騒音公害として出てきた20Hz以下の超低周波騒音公害などは、人間の可聴周波数範囲（20～20000Hz）の騒音計で計測していたために、人間の固有振動数に近い20Hz以下の超低周波騒音が埋もれてしまい問題視されなかったことが原因のようです。人間に無数にあると言われるパチ二小体その他の受容器（人間のセンサ）等が、遙か離れた場所から発生している超低周波騒音を聴覚以外で感じ取り、睡眠を妨害されたり神経系を犯されたりするのも固有振動数の存在と考えられるでしょう。首から肩、腰・頭蓋骨や背骨等いくつもの複雑な固有の振動モードをもった複合物質が人間を構成して作り上げているのですから、両目の画素数や無数にある身体センサなど部品として積算すると人間はとんでもない価格（価値）になります。

1-8 固有振動数になれ親しもう

振動になれ親しむためには、自分の身の回りの現象から易しく理解することが近道です。無理に理論や公式を暗記しても、本当に理解していなければ「わかりやすく子供に教えることも出来ません。」周波数（＝振動数と同義語）という言葉にまず親しみを持って接します。「私とあなたとは周波数が合う。」「足裏に感じる振動とあの大形杭打ち機が同じような周期で動いている。」「この装置パネルのビビリと天井の空調が同期している。」など色々な現象を自分の口の中でアナウンス（実況中継）してみましょう。実況中継が度重なり、ある特定の用語や現象に行き着くはずですよ。

固有振動数は、その数値が高くなるほど物質的に堅く剛体に近づき、その数値が低くなるほど柔らかくゲル状に近づいていきます。堅さや柔らかさを表す硬度が弾性係数（ヤング率）やポアソン比（与えられた応力に対する変形比率）に関連するのと同様に、モード（固有の周波数）にも密接な関連性があることを知ることになります。堅い支持材料では振動を伝搬しやすくし、柔らかい支持材料ほど振動の伝搬を抑える傾向は、トラックの荷台と観光バスの座席を比較し、そのまま伝搬してくる振動の大小或いは乗り心地として理解できます。日常、手に触れるさまざまな物質を軽く叩きながら、「この物質の固有振動数は、30Hzぐらいである。80Hzぐらいである。」など予測し、さらに測定して検証するのも楽しいものです。

1-9 パッシブ型防振台とアクティブ型防振台の違い

両者の違いは、防振の方式にあります。前者が空気ばねなどの材料特性による損失抵抗（粘性抵抗や空気抵抗など）を利用した制御であるのに対し、後者が前者の制御の一部を利用しつつも専用の振動（或いは震動の）検出センサによって得られたセンサ情報をアクチュエータに指令する制御系によって、電子的に位相調整（逆位相）するものです。つまり「打ち消しあう状態」を商品化したものです。

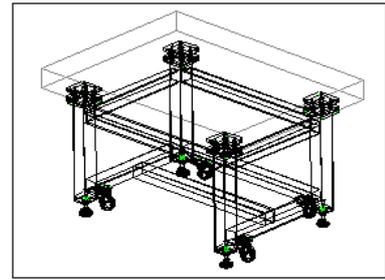
お寺の釣鐘の外が反響して大きな音が生じている時に、釣鐘の内部中央付近では「減衰されて小さな音になっている」点に着目して、音を積極的に和らげる高速道路などの外壁用開発が盛んです。振動も同じように打ち消しあうことが出来ないかという発想から、アクティブ型防振台が開発され始めたのかもしれない。どちらが先に発想されたのかは別として、きわめて面白い分野になっています。両者の最も大きな違いは、前者が固有振動数を持ち、後者が固有振動数を持たないという点にあります。

1-10 パッシブ型空気ばね式防振台

空気ばね式防振架台は、防振支持上（ばね上）総重量Mに対しては、静荷重状態で「ばね受圧面積S」と「ばねの内圧P」及び「ばね本数N（支持数）」を掛けた総数値と均衡を保つように設計されています。動荷重状態（Mの重心移動による不均衡状態）が発生すると、変動荷重分（ ΔM ）をメカニカルバルブによる圧力自動補正又は封入バルブでの手動補正によって内圧を補正します。ばね系材料の粘性抵抗と封入圧力の空気（気体）抵抗を損失係数として利用する空気ばね式防振台では、防振性を高めるため空気ばね内体積（スプリングチャンパー）の他に補助タンク内体積（ダンピングチャンパー）を付帯させて相互の間をオリフィス（絞り弁）で結合し、オリフィスによるエアーダンピングを行います。この補助タンクは、固有振動数を規定する大きな要因の1つとなっています。



この制御方法での利点は、メカニカルバルブによる圧力操作（圧力のIN・OUT・EXH）とオリフィスやスピードコントローラーによる流速・流量調整など低コストの部品構成で最大の効果を期待できることにあります。欠点として第1に、風圧やコード類の引っ張り・自らの動き（装置の挙動）に影響されやすい軟性支持であること。第2に、軟性支持であるが故に、作業上の操作・接触時に固有振動数に近似した自由振動を生じること。第3に、搬送系装置が介在した場合の「減衰時間」や「相互の位置精度」に大きな支障があること。第4に設置床面からの伝播振動のみが防振の対象であること、があげられます。



1-11 パッシブ型空気ばね式防振台の固有振動数

コイルばねや板ばね・ベローズ型空気ばね・ダイヤフラム型空気ばね・防振ゴム・防振パットなど使用する防振材料や構造から生じる系としての固有値、いわゆる固有振動数 f_0 と外来から入ってくる振動数 f との比（振動数比 $= f / f_0$ ）によって、おおむね防振効果が決定されます。パッシブ型防振台における固有振動数の存在は、人間の臓器にたとえるならば心臓に匹敵するほど重要なものです。固有角振動数 $\omega_0 (= 2\pi f_0)$ が周期 T の間に 2π rad 変化する時、防振台の系としての垂直方向の固有値は、次の簡略式で表現できます。ルートの中の記号で、 m はばね系に負荷される重量を示し、 k はばね定数です。固有振動数を上げるには k を増せばよく、固有振動数を下げるには k が一定の時に m を増加すること（ダミーウエートなどの使用）で変化します。勿論、補助タンク（ダンピングチャンバー）の体積やオリフィス形状の違いによっても固有振動数は変化します。

$$\text{固有振動数 } f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Hz})$$

また水平方向の固有値は、次の簡略式で表現できます。 G は重力加速度（ $= 980 \text{ cm/s}^2$ ）、 L は水平方向の自由度を規定する振り子の長さを示しています。固有振動数を変化させるには、 L の長さを調節することで確認することが出来ます。国内外の防振各社は、構造や使用材料の違いこそあれ、水平 H 方向に対する自由度を単振り子や逆振り子或は二重振り子などの「振り子の原理」若しくはその類似した構造を利用しています。

$$\text{固有振動数 } f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{G}{L}} \quad (\text{Hz})$$

1-12 パッシブ型空気ばね式防振台の防振効果・振動伝達率 T_r (Transmissibility)

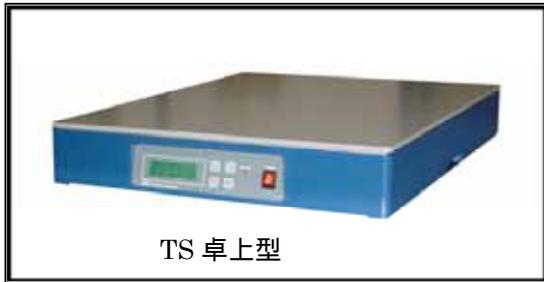
振動が 100% そのまま伝達される場合には、振動伝達率 $T_r = 100\%$ です。振動が 100% 以上に増加して伝達される場合には、共振領域に入っていることを示しています。共振領域中の最大値が共振点になります。この共振点は、減衰要素を規定する幾つかの損失抵抗を無視した単純計算で無限大になりますが、実際には使用される材料や構造による減衰要素が介在するため、ある共振倍率に対応する有限値として表されます。（振動伝達率 $T_r > 100\%$ ）防振台が機能してその効果を発揮するには、 $T_r < 100\%$ にならなければなりません。防振効果を示す振動伝達率 T_r は以下の簡略式によって表現できます。 T_r が 100% 以下であれば、防振開始つまり防振領域を形成し始めます。但し T_r が 99% の防振台と T_r が 1% のものが同じであるはずがありません。

$$T_r = \left| \frac{1}{1 - (\text{振動数比 } \lambda)^2} \right| \times 100\%$$

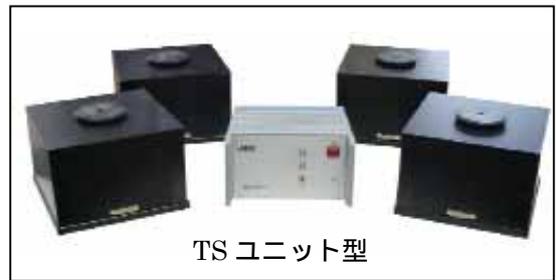
振動数比（ $= f / f_0$ ）を代入すると、防振台の固有振動数 f_0 と外部からの外乱振動 f が等しい周波数である場合には、計算上 T_r が無限大になり最大の共振現象を引き起こします。まず防振台が防振も共振もせずに振動伝達率 $T_r = 100\%$ になるためには、 f が f_0 の 2 倍の大きさでなければなりません。この領域までが共振点を含む共振領域と呼んでいます。防振台として防振効果が得られる点は、振動数比（ $= f / f_0$ ）が 1 以上に、つまり $f > 2 \cdot f_0$ 倍です。 f_0 一定の時、の周波数数値が高まるほど防振効果が高まります。また f の外乱周波数が一定の時、固有振動数が低くなるほど防振効果が高まります。

1-13 アクティブ型防振台

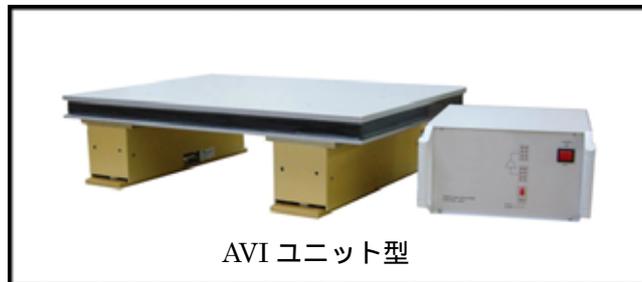
パッシブ型空気ばね式防振台の欠点（先に述べた 1-10 第 1～第 4）を補うためにアクティブ型微小振動制御システムが生まれました。設置床面から伝わる振動のみならず装置自体から発生する振動やコードの張り具合・作業上の接触・風圧などの影響が大きいこれらをも防振・減衰の対象にしています。ばね系の変動分をミクロン単位で感知する高感度センサで検出し、その情報はアクチュエータを介して瞬時に補正できることから、「減衰時間」や「相互の位置精度」の追求に大きく貢献します。防振支持系が固有振動数の無い硬性（剛性）支持に近似しているため、操作性が飛躍的に向上します。唯一の欠点は、高感度センサやアクチュエータなどの構成部品が、当然ながらパッシブ型空気ばね式防振台と比較して大幅なコストアップになることです。



TS 卓上型



TS ユニット型



AVI ユニット型

アクチュエータには、油圧式や電磁式・空気圧式・圧電式（ピエゾ）・リニア式などがあります。パッシブ型空気ばね式防振台と比べて際立った相違点は、固有振動数や共振領域が無視できる点やパッシブ型では得られない極低周波からの防振領域が得られる点にあります。減衰時間や位置精度が追求できる点などを考慮しても、私たちは十分すぎるだけの効果と価値を手にすることができます。仮にアクティブ型が現在のパッシブ型と同等価格まで下がるならば、パッシブ型は全てアクティブ型に切り替わってしまうでしょう。元来、アクティブ型の開発使命が、パッシブ型のウイークポイントである「固有振動数と共振領域」の消去にあることから、極低周波帯域からおおむね 100 Hz 未満（1000 Hz まで制御するシステムもあります。）をアクティブ（ダイナミック）制御とし、制御範囲以外をパッシブ型で補完し合うハイブリッドにすることで、総コストの引き締めが図られています。この場合の補完するパッシブとは、空気ばねやコイルばね・防振ゴムなど弾性体全般です。これは、単に制御周波数以外の防振をパッシブで行う目的だけではなく、反力の加え方として補助質量の慣性力を利用する方法や固定された面を利用する方法、構造物相互の反力を利用する方法など防振の目的によって選択します。

アクティブ方式の防振周波数領域

（当社販売システム）



1-14 デシベル (dB) 表示は「レベル値」

デシベルは、振動伝達率や防音率にも使用されています。デシベルが理解できなければ、防振効果や防音効果を示すデータを理解することが出来ません。国際単位系 SI でこれまでの便宜上の比較単位から昇格して広く実用単位として認知されています。「基準に対して大きいか小さいか」を表すものです。基準振動加速度を a_0 、実際の振動加速度 (実効値) を a とすると、以下の式で計算できます。10 の何乗の「何」に 20 倍したものがデシベル (dB) 値、レベル値になります。

$$\text{振動加速度レベル } L_a = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad \text{単位: dB}$$

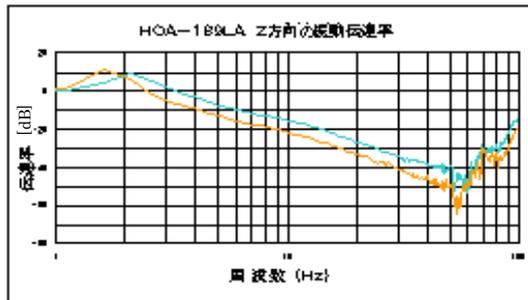
「振動加速度 A が 1 Gal の時、振動加速度レベル L_a が 60 dB である。」ことの証明を上記の関係式で試みてみましょう。

日本での基準振動加速度 a_0 は、 10^{-5} m/S^2 です。振動加速度の実効値 a が 1 Gal ($= 10^{-2} \text{ m/S}^2$) であるならば、以下のように確かに 60 dB になります。

$$L_a = 20 \log \frac{1 \times 10^{-2}}{10^{-5}} = 20 \log 10^3 = 60 \text{ dB}$$

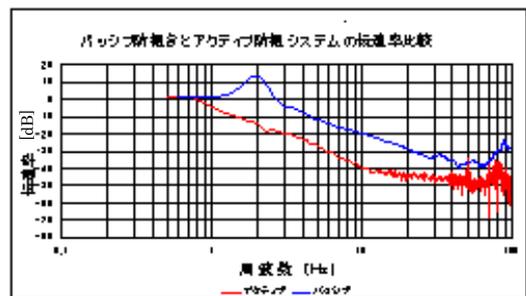
1-15 「防振台の性能を表す dB 値」と「固有振動数の違いがもたらす dB 値の変化」

dB 値は、あくまでも基準となるものと比較するものとの両者を比べるための数値ですから、基準をどこに置くかでまったく気配が変わってしまいます。一般的には、基準振動加速度や基準音圧を 0 dB とした場合の比較値となりますが、防振台の性能を評価する場合には、振動減衰もあれば振動増幅もあるため、防振も共振もしないニュートラルなレベルを 0 dB ($T_r = 100\%$ の状態) とし、共振領域を +dB 値に防振領域を -dB 値にした T_r 曲線で評価します。パッシブ型防振台の dB 値は、固有振動数 f_0 の違いによって変化します。



上のデータは搭載荷重の違いによる防振性能 (固有振動数) の差を振動伝達率曲線によってあらわしています。

青線は、145 kg の負荷を空気ばねに均等に載せ、オレンジは、350 kg の負荷を同じく均等に載せたデータです。

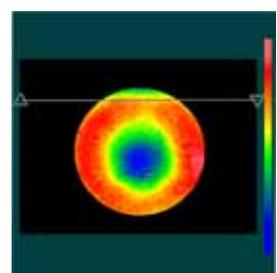
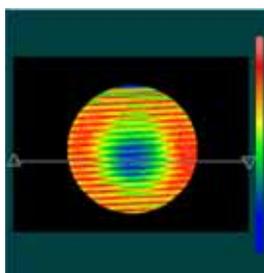


上のデータは、防振性能において著しく違うデータを示しました。

データの青線は空気ばね式防振台の振動伝達率曲線で、赤線は、アクティブ防振システムの振動伝達率曲線を表しています。

実際上、固有振動数の影響を持たないアクティブ防振方式と明らかに固有振動数を持つパッシブ防振方式の性能の差が顕著に出ています。

下のデータは、アクティブ型防振システム AVI にレーザー干渉計を搭載し、制御 SW の ON・OFF 時における防振効果のデータを示しました。



1-16 振動加速度 A と振動加速度レベル L_a ・ 気象庁震度階に関連する比較

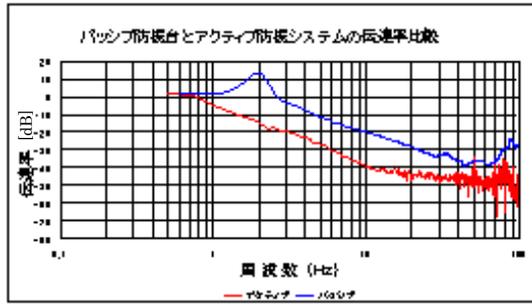
振動加速度は、加速度センサによる振動加速度測定の実効値であり、振動加速度レベルとは違います。

動加速度レベルは、1-15 で述べたように基準振動加速度 10^{-5} m/s と比較した時のレベル値 (dB 値) です。両者の対比に日本気象庁による震度階と参考的な事例を合わせて作成すると別紙の表になります。20 dB 差で 10 倍又は 1/10 に、10 dB 差で $\sqrt{10}$ 倍又は $1/\sqrt{10}$ になります。通常発生する有感地震 (震度 1 から震度 4) の間は、規則性のある 10 dB 差になっていることがわかります。

振動加速度と他の表示レベル値との関係表

振動加速度 A (cm/s^2)	振動加速度レベル L _a (dB)	気象庁 震度階	備考 : 事例など
0.001 Gal	0	震度 0	基準振動加速度 (10^{-5} m/s^2) 1mgal
0.0014	3		
0.0018	5		
0.0025	8		
0.0031	10		
0.0045	13		
0.0056	15		
0.008	18		
0.010	20		0.01gal
0.014	23		
0.018	25		
0.025	28		
0.031	30		
0.045	33		
0.056	35		
0.08	38		
0.10	40		0.1gal
0.14	43		
0.18	45		
0.25	48		
0.31	50		振動感覚いき値
0.45	53		
0.56	55		第一種夜間工場基準
0.8	58	震度 1	
1.0	60		睡眠深度 1 で過半数覚醒 1 gal
1.4	63		
1.8	65		睡眠深度 1 で覚醒 / 第一種昼間・第二種夜間
2.5	68	震度 2	
3.1	70		
4.5	73		
5.6	75		睡眠深度 2 で過半数覚醒 / 第二種昼間基準
8.	78	震度 3	
10	80		ISO 8 H 快感減退境界 10 gal
18.	85		地震による被害が生じ始める
25.	88	震度 4	
31.	90		ISO 8 H 疲労・能率減退境界
56	95		ISO 8 H 暴露限界
80.	98	震度 5 弱	
100.	100		地震被害が拡大 100 gal
140.	103	震度 5 強	
250.	108	震度 6 弱	中規模地震で被害甚大
450.	113	震度 6 強	
800.	118	震度 7	
1000.	120		$1000 \text{ cm/s}^2 = 1000 \text{ gal} = 1 \text{ G}$

1-17 パッシブ型空気ばね式防振台とアクティブ型防振台のTr振動伝達率データ比較

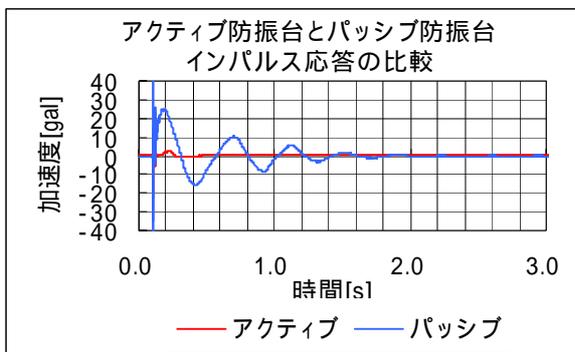


パッシブ型空気ばね式防振台は、設置床面からの防振効果を引き上げるために固有振動数 f_0 を可能な限り低くなるように設計します。設置床面から伝わる振動のみを防振対象とするために当然のことです。固有振動数の引き下げは防振能力の向上というメリットがある半面で、防振系が軟性支持になり、空気ばねに支持されたベンチおよび搭載された機器の安定性に影響を受けやすくするデメリットがあります。いわば、固有振動数が「諸刃の剣」になっています。実際のTr曲線では、以下に示すように損失係数の影響である有限な共振倍率に基づく、卓越した共振領域を形成しています。

次にアクティブ型防振台は、パッシブ型のマイナス面である共振領域を大幅に縮小させ、極低周波から防振領域を形成していることが特徴です。

パッシブ型 Tr 曲線 アクティブ型 Tr 曲線

1-18 減衰時間の比較



パッシブ型が固有振動数及び共振領域があるため、意図的な加振を試みると、固有の周期性（固有振動数）と減衰性（減衰時間のあらし）が見られます。

アクティブ型では制御方式とゲイン調整によって防振初期の周波数において加速度レベルがわずかに0レベルを超えることがあります。意図的な加振を試みると、瞬時の減衰性を示すことが特徴です。

1-19 重心移動などによるベンチの復元精度（位置精度）

パッシブ型の代表格である空気ばねは、合成ゴム皮膜と周辺の金属部品から成り立っています。空気ばねは、合成ゴム材が単一構造材或いは布製メッシュ材の補助があっても、弾性体であることに変わりはありません。この時の空気ばねの特性（ヒステリシス）は、非線形であることが一般に知られています。負荷重量に対応する圧力調整を行う各種メカニカルバルブを利用して、如何に復元精度を高められるにせよ内部気体（圧搾空気や窒素ガス等）の圧縮性と前述の非線形性とがあいまって復元精度に限界があることは周知の事実です。

1-20 アクティブ型防振システムの有効利用



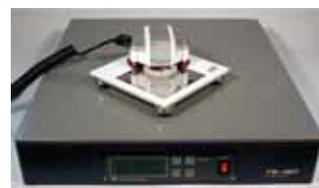
写真ご提供：キヤノンマーケティングジャパン株式会社殿ご提供



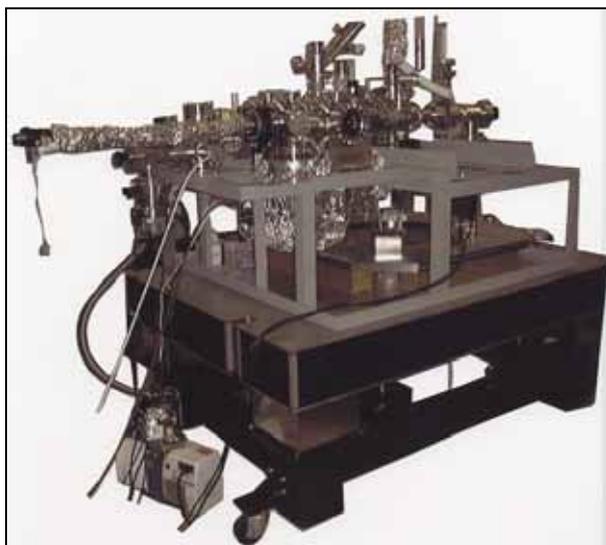
写真ご提供：P S A I 殿ご提供



写真ご提供：岩通計測株式会社殿ご提供



写真ご提供：有限会社テク殿ご提供



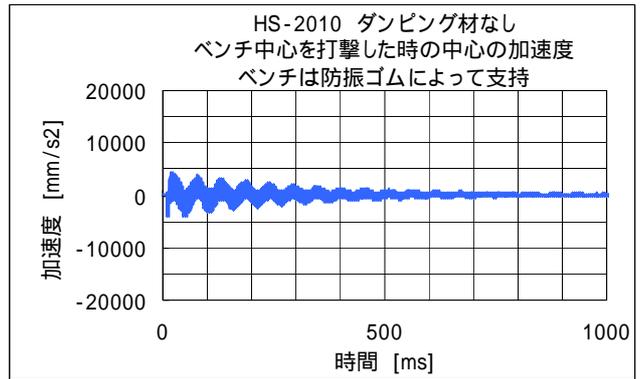
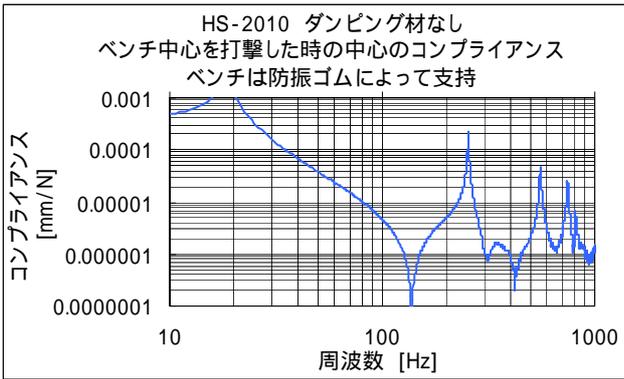
写真ご提供：大阪大学森田研究室殿ご提供

アクティブ型防振台の設備は理想的には、アクティブ型防振台を製造・販売する企業から防振部を含む定盤や架台をセットで購入することを推奨します。如何に優れたアクティブ型防振部であっても、使用する定盤や架台が剛性不足であったり或は制振(ダンピング)不足であったりした場合に大きな支障となる場合があります。何故ならば、アクティブ型がミクロン単位で床からの振動や装置自体の挙動を制御しようとしている時に、架台部や定盤部がミクロン単位であれ「たわみ」や「ねじれ」、「共振」を引き起こすような状況では防振効果に大きなマイナスの影響がでます。何を以て基準とし制御をかけるかがボヤけてしまいます。防振システムを構築する上で失敗しないために、まず、光学定盤(アルミハニカム製フラットベンチ・スチールハニカム製フラットベンチ)内部に制動・制振効果のあるダンピング(damping)特性をもたせることです。単一構造や複合構造にかかわらず、形のある構造物には、必ず低次曲げ共振周波数を含む n 次共振点をもっています。各共振点での共振倍率が高いほど、盤面を叩いた時のビビリや鈍い濁音を感じ取れます。通常では定盤上に各種の搭載システムが固定され、盤上に搭載機器の質量が負荷されるために影響が低減されていますが、アクティブ型を採用する防振レベルでは無視できないケースが増えると予見できます。第二に、架台の剛性と制動・制振の向上が挙げられます。架台は、一般的に角パイプ鋼材やCチャンネル鋼材・Lアングル鋼材・アルミ引き抜き材などによる溶接一体構造或はビス止めで設計製作されていますが、加振実験に基づく各架台の共振点及び共振倍率の大きさによってはアクティブ防振システムを支持する架台として不適当なものがあります。

1-21 光学定盤のダンピングとコンプライアンス

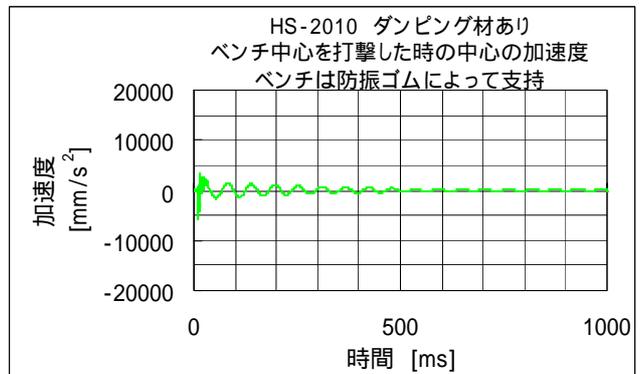
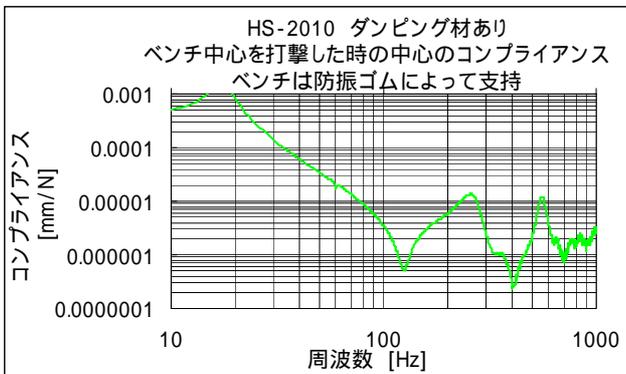
ダンピング(damping)は、弦などの振動を抑制したり(制振・制動させたり)弱めたり(減衰させたり)する意味のダンプ(damp)からきています。これらの「振動を抑制したり弱めたりする」減衰部品や用具は、古くからダンパー(damper)と総称されていますが、「制動子或は振れ止め具・動吸振器・弱音器」など使われ方の違いで特殊な言い回しになる場合があります。商品としては、広義の意味で空気ばね式防振台の空気抵抗と粘性抵抗を利用するエアードンパーを始め、防振台のオリフィスによるエアードンピング制動やオイルによる粘性抵抗を利用したオイルダンパー、ドア開閉部の動きの速度制御に使用するガスダンパー(ガสปリング)など振動の防止や抑制・衝撃力や動きの緩衝具・動作上のブレーキなどに利用されていることはご承知のとおりです。光学定盤のダンピングは、こうしたダンピング技術の特殊応用例に位置づけられます。定盤の内部に計算された適切なダンピング材やダンピング器を用いることによって、振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、振動を減衰・抑制させることが可能です。こうした目的で作られた定盤は、ダンピング機能付として高付加価値な仕様となり、一般の定盤との差別化をはかることができます。すでに海外では、約20年まえから当該品の実用化が進んでいます。内部に水やオイルなどの液体を封入した容器を入れ、外力が加えられた時の変位変形や卓越モードの低減(共振倍率の引き下げ)を行います。当社では、光学定盤全般(アルミハニカム製やスチールハニカム製を問わず)に適したダンピング機能の開発が終了し、商品化しています。

ハニカムベンチ・ダンピング機能無しの時のコンプライアンス曲線と時間軸減衰デ - タ



(ベンチは、防振ゴムによって支持したために、防振ゴムの固有振動数が波形に出ています。)

ハニカムベンチ・ダンピング機能有りの時のコンプライアンス曲線と時間軸減衰デ - タ

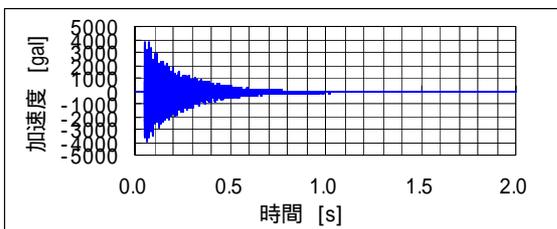


(ベンチは、防振ゴムによって支持したために、防振ゴムの固有振動数が波形に出ています。)

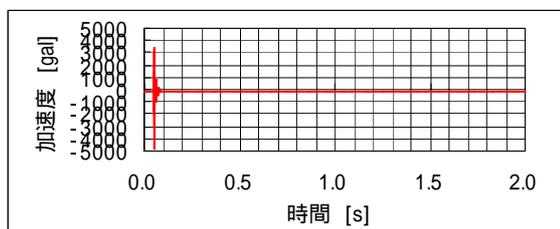
1-22 防振架台やハニカムベンチのダンピングと振動伝播状態

前述したように、一般的な架台の共振倍率は非常に高くなっています。アクティブ型防振台に使用する架台部においても、光学定盤のダンピングと同様に制振性や制動性を高める工夫が求められます。以下は、防振架台とハニカムベンチ・ダンピング機能の有無による加振力の時間軸における減衰を示しています。

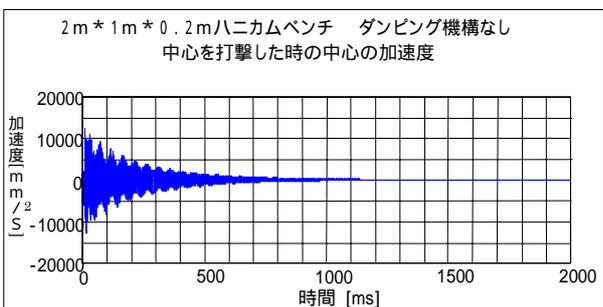
防振架台・ダンピング機能なし



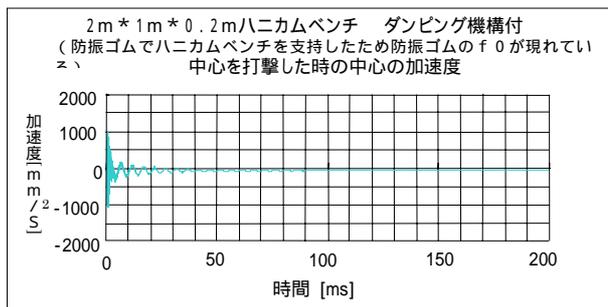
防振架台・ダンピング機能付き



ハニカムベンチ・ダンピング機能なし



ハニカムベンチ・ダンピング機能付き



1-23 コンプライアンス

今までコンプライアンス (compliance) という用語は、ほとんどの人が聞き慣れなかったと思います。辞典によれば、「要求や命令などへの応諾や追従・盲従」と訳されています。最近では、ビジネスや投資信託、法律倫理など幅広い分野でコンプライアンスという用語が使われ広まってきました。定盤での解析では、入力に対する応答出力の関係として捉えます。構造物に応力を加えた時の変形、力に対する変位です。コンプライアンス (c) の単位は、mm / Nで表します。

定盤に外部からの力Nを与えた時の応答を変化量として計測することになりますが、横軸に周波数を対数で示し縦軸にCを対数で示すコンプライアンス曲線を求めます。コンプライアンスの数値は、力に対する変位変形が小さく且つ曲線データの下方部に位置するほど理想に近づきます。ただし、この場合には、縦軸の単位やスケール分割の表し方でイメージが変わってしまうため統一性が望まれます。又、Cの数値が小さくなるほど理想的ですが、重量も増加する傾向になります。対重量剛性比との兼ね合いで「ある種の巨大なばね系K」と考えられる定盤の重量と剛性との比を理想に一步でも近づける努力が必要になってきます。定盤のばね定数Kが大きい(硬い)ということは、コンプライアンスCが小さい(剛性が高い)ことになり、逆にばね定数Kが小さい(柔らかい)ということは、コンプライアンスCが大きい(剛性が低い)ことを示しています。定盤に加える力をF, 変化量(変位量)をX、コンプライアンスをCとすると、 $C = X / F$ になります。右辺を整理すればCが $1 / \omega^2$ に反比例して減少することがわかります。したがって外部からの力が一定の時、周波数が低域になるにつれて変化量(変位量)が増加し、1次共振点で最大の卓越変位量となることから、低次曲げ共振周波数(1次モード)における共振倍率を読むことが一般的になりつつあります。実際、この世の中で全周波数帯域に渡って「完全理想剛体」に近い形状は、やはり真球でしょう。光学定盤のハニカムコア材を高価なアルミニウム合金製にするか、加工性や工数増加があっても安価な鉄材(スチールハニカムコア)製にするか、上面板材の厚みを5tにするか6tにするか、など剛性の追求と軽量化の追求は相反します。問題は多少の共振点の違いを問題とするのではなく、共振点での共振倍率がどこまで落とせるのかが重要です。共振倍率が小さければ、定盤を叩いたときの「鳴き」も少なく軽量で且つ外部応力に対する変化量が少ない理想的な定盤になります。コンプライアンスCのデータを理想に近づける手法「理想的なダンピング技術の応用」は共振倍率の引き下げ、つまり「反共振現象の追求」といえるでしょう。

1-24 時代の要請で変貌を遂げる防振技術

レーザー等光技術の出現と防振技術の発展

レーザーを光源とする計測システムの代表例として大口径の干渉計が挙げられます。防振台に求められる技術としては、「振動加速度の低減」とこれを忠実に実行するための「固有振動数の低減」があげられます。この二十余年の間に、国内外で防振台やベンチの大形化(例えば6m x 2m)垂直方向及び水平方向の防振能力は飛躍的な成長を遂げてきたことは周知のとおりです。この背景には「固有振動数の引き下げ競争」といわれるものがあり、パッシブ型防振台における振動伝達率を極限まで抑えるためには、このように固有振動数を極限まで下げる必要がありました。今日のレーザーを使ったさまざまな光学システム用防振台の基礎となっています。静的荷重条件が大半を占める実験機・開発機用として利用されています。

光技術と半導体技術の発展と防振技術の多様化

レーザー等光技術の発展は、さまざまな計測技術の向上をもたらす今日に至っています。また半導体技術の発展と相まって、高度な位置決め装置や評価装置の発展・クリーンルーム化(高度防塵技術)の促進があげられます。求められる防振技術は、静的荷重から動的荷重への対応並びに搬送系に対応した「減衰時間や復元精度」などもその要求項目としてあがっています。空調設備内で発生する風圧の影響を最小限に抑制し、また減衰効果としての振動加速度量の低減にとどまらず減衰時間や復元精度の追求をめざしてアクティブ型防振台の開発と商品化が始まりました。パッシブ型においても、さらなる減衰性(減衰時間の短縮・減衰効果の向上)を追求するとともに、クリーントップベンチ(シールドトップ)や排気系の集中処理・クリーン材料の採用なども要求されています。また、防振台が実用機・応用機として装置の一部に組み込まれています。

ナノテクノロジー - の開発と防振技術の見通し

本格的なナノテクノロジーの時代となり、ナノの世界で観察・加工・分子や原子の組み替えを行うためには、さらなる周辺環境を整備する必要があり防振もその1つとして重要な要素となっています。パッシブ型の欠点(諸刃の剣と言われる固有振動数の功罪・接触時及び動的荷重時の自由振動誘発・コード類からのループ振動や装置自らの振動に対する弱さ・極低周波帯域に対する防振能力の低さ・長い減衰時間・低い復元精度など)を解決する目的で生まれたアクティブ型の実力は、理論目標の70%とも80%ともいわれ、また精密・超精密分野におけるアクティブ型の出荷比率は、年を追うごとに増えています。

今後のアクティブ型の進化と市場からの要請で、ますます多様化した防振システムとして用いられます。すでにアクティブ防振システムが日常化となった現在、従来の振動加速度のみではなく「架台や定盤の剛性」を想定した相対変位まで追求する時代となっています。マイクロレベルで振動を制御するのに、架台や定盤の剛性

不足によるたわみやねじれ或いは振動増幅となるビビリ現象を放置すれば、何を基準に測定しているのかわからなくなる場合があります。振動の減衰性と架台や定盤など構造体の制動性(ダンピング)や剛性をさまざまな角度から追求する総合的な防振技術が求められます。防振台が技術集約型となるいわばナノテク機になっていきます。

1-25 防振と制振について

防振(除振)は、振動源自身の振動や振動源から伝搬する振動を各種の固有振動数が低く柔らかい防振材料(例えば、防振ゴムや空気ばねや、コイルばね)を介して振動を減衰させることを目的としています。要求される振動の減衰率(防振率)や許容される機器に対応する振動レベルなどによって防振材料や構成する設計上の仕様が大きく異なります。

防振(除振)は時として振動絶縁とも言われ、絶縁という電氣的な用語から限りなく振動を断つような或いは振動をゼロにできるようなイメージで捉えられがちですが、振動量から見ればあくまでも「振動の入力に対する効果としての出力」として有限的な率になります。これは防振率や真空度と同じです。振動が周波数に大きく依存するため、どの周波数帯域でどれだけ減衰させたいかという目標によって一般的なパッシブ型防振(除振)と新しいアクティブ型防振(除振)を選択する時代になってきました。

前者が「防振(除振)材の固有振動数と外乱振動数という振動数比の理論」から成り立ち、後者が反力をともなう材料と高感度な振動検出器・逆位相をかけるアクチュエータ・制御系から成り立つハイブリット式(低周波帯域はアクティブ方式で防振を行い、アクティブ方式では効果的に制御できない周波数帯域はパッシブ方式で防振を行う)になっています。

制振は、粘性と mass のある各種制振材料(卓越した振動や衝撃波などの吸収に効果があるとされる材料)の中から選択して、反共振の原理による効果を持たせることが目的です。制振効果(ダンピング効果)は、特定若しくは特定周波数帯域での卓越振動(Q値)を速やかに低減させることであり、制振材で前述の防振(除振)目的を全面に負わせることは出来ません。卓越した振動のピーク値は、入力する振動の運動エネルギーを熱エネルギーに変換する効果でQ値の変動成分を穏やかに・なだらかにします。時間軸波形で追えば、上下方向に推移する振動振幅(加速度振幅・変位振幅・速度振幅)が時間とともに減衰する様子が読み取れます。入力する振動(力)による変位応答(出力)を低減することでQ値として卓越した共振倍率が減少する、つまり反共振の状態を作り出します。

形のある物質或いは構造体には、それ自体が持っている固有振動数(固有値・固有モード)があります。各種定盤部や防振架台部にも構造的なモードが存在します。1次～6次に渡る振動モードは、定盤に限られず架台にも存在し、剛性に比例して曲げやねじれの動きと連動・連成することが分かっています。お寺の釣鐘を叩くと共鳴してより大きな音が発生しますが、打楽器や弦楽器と同様に共振状態(=共鳴状態)を利用しないで、逆に嫌う世界、つまり測定環境の創造を迫る為には、防振(除振)と制振を複合させた効果や場合によっては防音やその他の外乱まで対象とする必要があります。

1-26 VC規格などの規格と防振台の選定方法

一般的な選定方法

事前の振動測定は不要です。

主に過去の経験則から判断した選定になります。予定される搭載機器の分類・種類・測定分解能などから、これまでに類似機器で経験した防振台の納入実績や要求仕様の傾向などを参考にして選定します。また、項の搭載機器に許容される振動レベル例も大まかな選定の判断基準とします。但し、設置環境の条件が全く無視されるため、設置場所によっては信頼性の点で疑問が残る選定方法です。

より信頼性の高い選定方法 / その1

事前の振動測定が必要です。

振動加速度と振動周波数のスペクトルを周波数解析します。協議により設置予定場所の振動環境を事前測定し、得られた振動データを防振台特性(振動伝達率/Tr曲線)に代入し、支障のない防振台の選定を行うためのシミュレーションによる選定方法です。

設置場所の振動加速度(地動外乱)が防振台の特性を介して防振台上でどのようになるかの予測が可能となるため、より信頼性の高い選定方法となります。

より信頼性の高い選定方法 / その2

項と同様に、事前の振動測定が必要です。

項で得られる振動測定データの一部をVC規格に当てはめることで、測定機に与えられた振動条件が規格に入るか否かを判断して選定します。振動周波数に対する振動速度の関係で評価されますので、得られたデータは1回積分して運用します。

ここで言うVC規格(Vibration Criterion)とはISOの基準も参照にした「許容可能な振動レベルの指針」で、VC-AからVC-Eの5段階評価に対して搭載予定機器の振動許容値の範囲に入るか否かを判断して選定する方法です。

の総合的な判断による選定方法

振動を評価するには、振動を構成する4因子(要素)の関係を見なければなりません。搭載機器は、振動加速度に影響するもの・振動速度に影響するもの・振動変位に影響するものに分かれます。国や機器によりいずれの振動関係を重要視するかの判断に差があります。全体が見られるトリパライトグラフでは、一般的なお客様で分かりづらいため、 から を複合した選定方法が推奨されます。

おわりに

本書は、「パッシブ型防振台」と「アクティブ型防振台」の違いについてわかりやすく解説することに目的があります。但し周辺の関連用語を無視しては意味をなしません。また、パッシブ型の損失抵抗・減衰率を含んだ複雑な関係式、アクティブ型防振台の配線図や理論図を併用したところで、学術書ではないためにそれらは割愛しました。また、次の機会を得て、「ナノテクノロジー - を揺るがず、電源コード1本から伝わる振動対策」および「振動指センサと耳振動センサ」など、現場における防振対策についてまとめてみます。これからパッシブ型や或はアクティブ型の防振システムを設備しようと検討しているユーザーにとって、その違いや概要がご理解戴ければ幸いです。

以上
ヘルツ株式会社
営業部 部長 木村 了