

騒音・振動対策案

BBM 川原浩司*

1 はじめに

騒音の対策に関する優れたテキストがある [1]。これを参照し M2052 合金の使い方を展開する。従来の制振材を単に代替するだけで効果を獲得できる場合は勿論であるが、従来にはないまったく斬新な使い方も考えられる。

2 騒音の発生原因

2.1 一般論

- 力・圧力・速度が変化すると騒音が発生しやすくなる。変化を緩やかにすればよい。
- 空気伝播音は、固体の振動あるいは流体の乱れによって発生する。楽器、ラジエータはそれぞれ空気や水の振動によって騒音を生ずる。パイプの場合、壁や天井から支持するときにはパイプと固定具との間に制振材を入れて対策する。普通は、コイルで吊るすか、固定具とパイプの間にゴムなどを挟む。ゴムやソフトな制振材は 2 次の低周波を誘発する危険を伴う。図 1、図 2 のように、固定具とパイプの間にゴムを挟む場合、ゴムがソフトであることに関する問題が起こる。パイプが細く固定具間の距離が長いほどパイプによる低周波が発生する。**M2052 合金による固定**はこの懸念から開放される。M2052 は固定と制振を兼ねる。プラント・船舶・自動車・建造物や大型機器や装置の配管に使えると見られる。
- 振動は遠方まで伝播し、そこで新たに音を生み出す。エレベータは、図 3、図 4 に見られるように、コンクリートの床や柱を伝播する。モータなどからの振動をコイルで緩和させる手法がよく使われるが、コイルによる遮断効果は薄い。鋼鉄で構成されているコイルバネはほとんど振動を吸収する能力はないからである。衝撃荷重に対してはそれを緩和

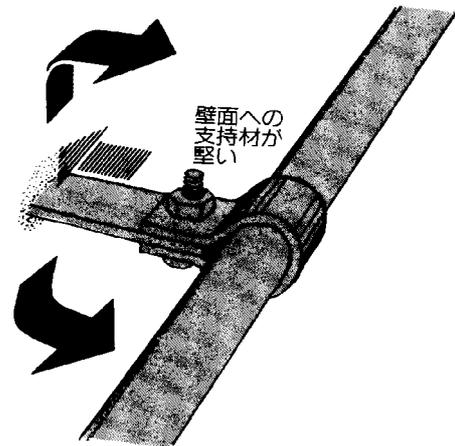


図 1: パイプの固定化による制振例 1

する機能だけが働き、制振材ではないから定常的な振動の低減は少ない。高周波振動はそのコイルを往來できる。M2052 はコイルも得られているから、これを用いることによって衝撃と定常的振動の双方を一度に低減が可能である。鉄鋼材のコイルと直列で使うことも出来る。

軌道のレールは振動を遠方まで伝える。この場合、伝達方向に対し M2052 の薄板を直角方向に挿入するだけでも伝達の抑止に効果があると見られる。

- 高周波音は指向性が強く反射しやすい。反射壁の設置は有効である。空气中伝播の減衰は大きい。ファンの騒音対策として、騒音の周波数を高めるためにファンの枚数を増やせば騒音が到達する距離は減少する。
- 低周波音は回り込みが起こり、開口部から漏洩し易い。
- 周波数が高いと「うるさく」、低いと「静か」に聞こえる。

*独立行政法人 物質・材料研究機構 元客員研究員 工博

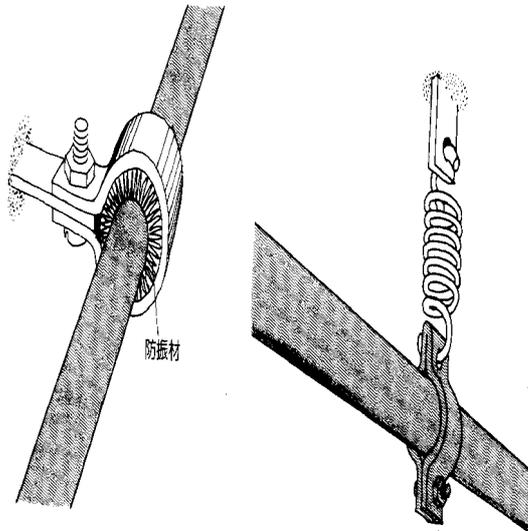


図 2: パイプの固定化による制振例 2

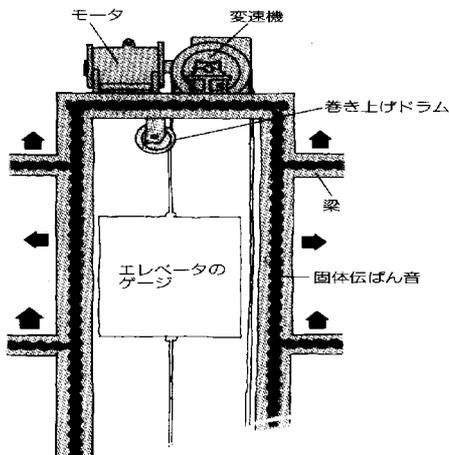


図 3: エレベータの振動伝達例

- 振動体が板に接して騒音を発する場合、その板の面積で異なり、面積が大きいほど騒音も大きい。したがって、振動源と広い面積をもつ板との接触を避けるかするとよい。
- 振動板として作用するパネルは穴が多数あると騒音反射が減少する。穴に代わり、網、格子、網状の鋼板なども有効である。
- 同一面積であっても長方形よりも正方形の板のほうが音を発生しやすい。幅広ベルトからの騒音は同一面積であってもそれをスリットしたほうが騒音は出ない。エッジ部は振動が抑制されるからである。
- 振動する板の端を自由端にすると周波数の低い振動は減少する。スピーカの振動板の端、台車の幌の端

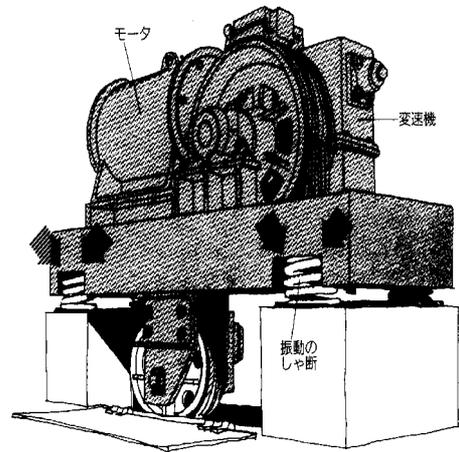


図 4: エレベータの振動絶縁例

は自由端にすると騒音は減少する。

- 衝撃騒音は、物体が軽く速度が小さい場合はヘッドを下げるか、落下の途中に中間ステップを介すると衝撃音は減少する。
- 共振の回避に心がける。ガラスを叩くと甲高い音ができるが、一部に接触体があると音は小さくなる。回転体、たとえば、グラインダーや丸鋸はフランジで押さえると制振効果が出る。コンクリートや石材の切削加工に使われている円盤は強烈な騒音を呈するが、フランジタイプの円盤を添えることで騒音は減少する。M2052 合金はグラインダーの騒音低減にフランジとグラインダーの間に 0.1 ~ 5mm 厚の円盤を挿入することでそれを達成している。図 5 の右図のように、フランジと円盤鋸との間に入っているゴムに替わって M2052 製の 1mm 程度のシートを挿入することで効果は現れる。フランジ自体を M2052 合金にしても有効であるが、薄板の挿入でも効果はある。
- 共振周波数を高くすると共振は回避できる。振動しやすい大きな表面を有する板においては、固有振動数を上げるとよい。強度を補強するか制振材を添えると効果が上がる。
- 風の音はカルマン渦によるもので、それを発生させないように工夫する。整流を心がける。尻尾やイボを設置し、空洞の開口部に気流が出来ないようにする。

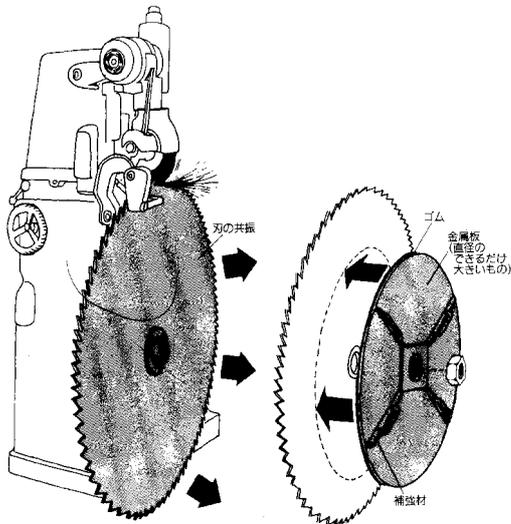


図 5: 円盤からの騒音対策例

2.2 ダクトとパイプ関係

- 内部の断面変化やダクトのフランジ間隔が接近していると乱流が発生し、垂直方向に騒音が生まれる。図 6 のように、蒸気バイスの分岐にバルブを使うが、パイプの分岐角が鋭角であったり、バルブ間隔が短いと乱流が出やすい。そこで図 7 のように、バルブ間隔を長く取るか、分岐パイプの角度をゆるやかにすると静粛効果が現れる。M2052 合金はバルブにも使え、バルブやパイプの中に騒音が生じても吸収能力があるから、water hammer などの対策にも有効である。ダクトやパイプの止金にも効果が期待できる。

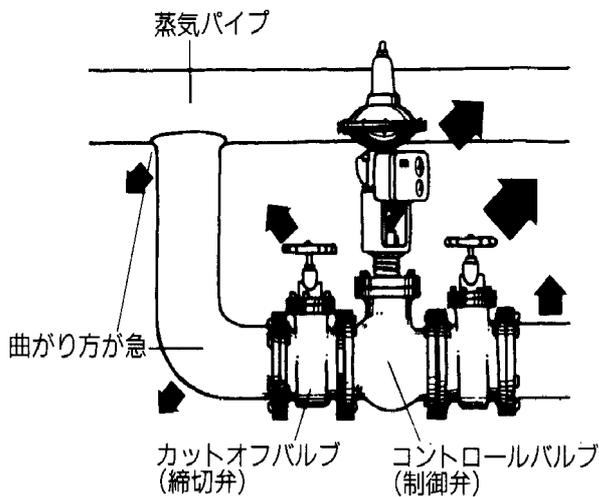


図 6: バルブ系からの騒音源

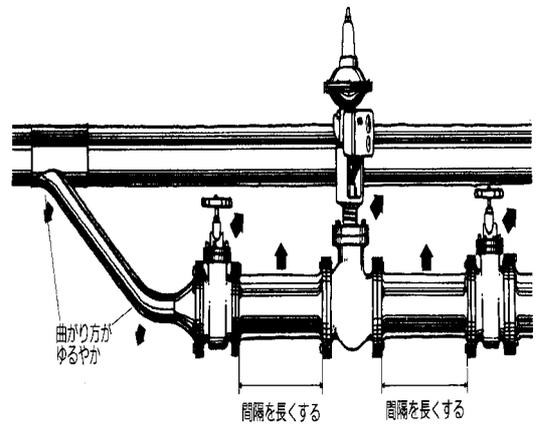


図 7: バルブ系からの騒音対策例

- 気流が静止気体と混合する手前で乱れが生ずると騒音が出る。流速が小さいほど騒音は小さい。対策例としては、多孔質材や金網をつけた排出口ノズルをつける。
- 噴出音は、図 8 のように、ジェット気流の周りに気流を付け加えると減衰する。ノズルの部分によって強く振動するため騒音を発生しやすい状況にあるが、その部品を M2052 合金で作れば効果は大きい。

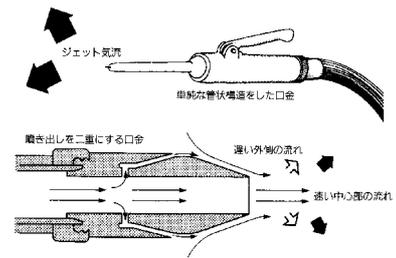


図 8: ノズルの一部に M2052 を使う

- 低周波噴出音は、高周波噴出に作り変えるとの傾向が出る。図 9 は、口を小さくしてその数を増して噴出音を高周波にした例である。安全弁は、排出の先端に穴を多く開けた円錐状の拡散板を作り、高周波に変換している。
- ダクトの伝播経路内で流れに変化が起こる場合、伝達する音のエネルギーの一部は後方へ反射し、減衰に寄与する。図 10 のように、断面積や形状の変化、材質の変化、ベントやブランチがこの変化に該当する。

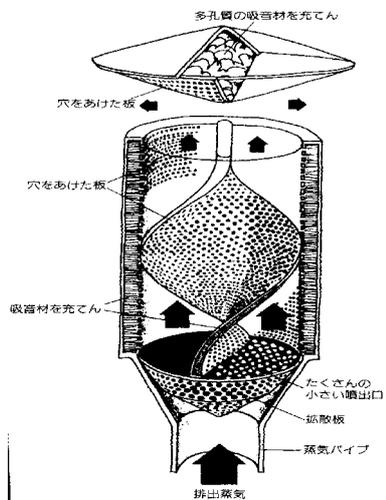


図 9: 噴出流を分散させる例

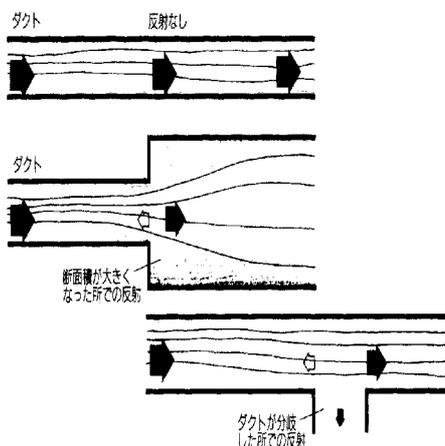


図 10: 流れの急変する場所からの音の反射

2.3 ファンの騒音

- ファンの前に障害物があると乱流が生じ、また、ファンに入ってからでも乱れる場合には騒音は増長する。ファンに入る前に制御版を置く場合はファンとの間隔を大きく取る。通路が直角に曲がってすぐにファンに遭遇すると強烈な騒音となる。整流ガイドはゆるやかな曲線のコーナにするとよい。

潜水艦のプロペラは古くから Mn Cu 系合金であるソノストーンが使われていることから、乱流以外にもファン材料の制振性能も深く係わりがあると思われる。常識としては、ファンが制振材であることが有効であるとはほとんど予想されない。

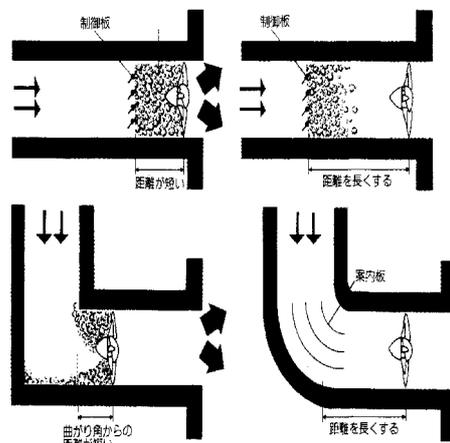


図 11: 整流の乱れに注意すること

2.4 導管

- 狭い路から広い路に急にでると圧力が急に低下するため、そこに乱流が発生し騒音が生まれる。導管に勾配をつけるとよい。図 12 のように、径の小さい弁はその場に乱流をもたらし騒音を出しやすい。これを避けるためには、図 13 のような、弁の径を大きく、しかも流れをスムーズにするとよい。

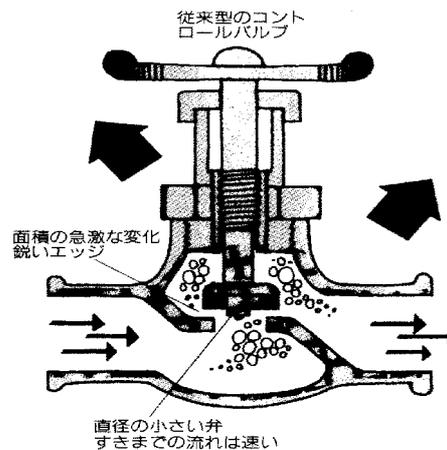


図 12: 導管断面の急変は乱流を発生する

- バルブなどがあるため、液体の圧力が急激に変化するとキャビテーションが生じ、騒音を生む。段階的に減圧するか、圧力調整器具をつけるとよい。図 14 のような、垂直方向に弁がおかれている場合、弁の近傍にキャビティが生じ、この気泡が潰れる際に騒音が生まれる。流速が急変することを緩和するか、図 15 のような、調整弁の前方に流速をスムー

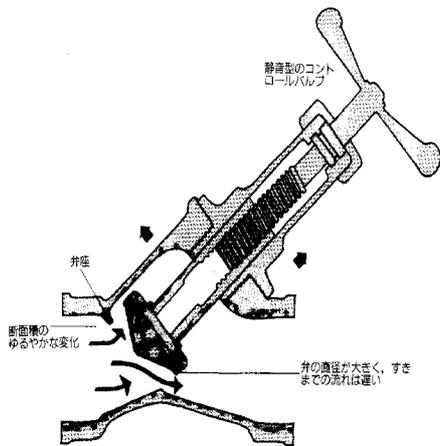


図 13: 乱流を無くす工夫例

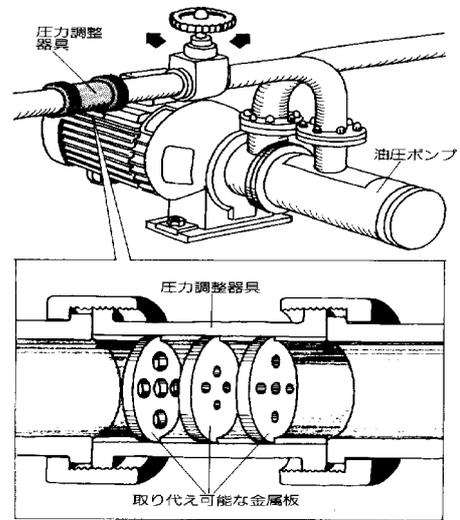


図 15: 圧力の急変を緩和させる調整器具

ズにする「圧力調整器具」を設置するとよい。

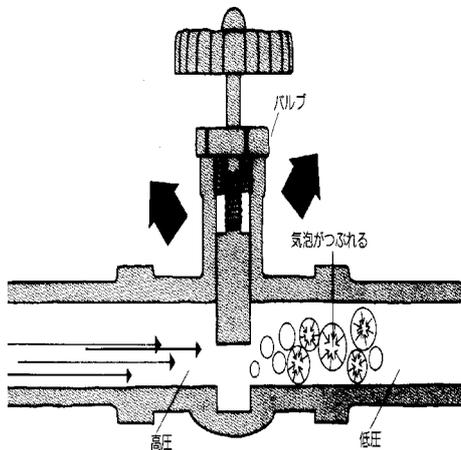


図 14: 圧力の急変はキャビティを作る

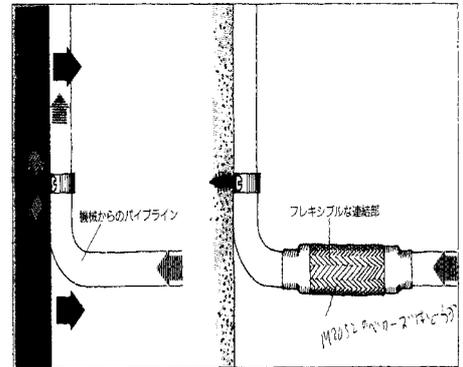


図 16: 壁からとそれへの振動は低減する

- 導管を伝わる音の遮断 オイル・電気・水の振動遮断にはフレキシブル管やベローが適している。図 16、図 17 は、フレキシブル管による振動対策例である。

M2052 合金はパイプやベローが製造できるからこのような応用は最適である。

2.5 消音器関係

- チャンバーが経路にあると低周波を吸収できる。図 18 にその例を示す。ジャックハンマーにこれが応用されている。
- 空洞型消音器 周波数が低く、狭い周波数域の場合

には効果的。空洞チャンバーを連結すれば吸収域は広がる。図 19 はその一例である。

- 充填型ダクト消音器 ダクトの内壁に吸音材を取り付けたもの。低周波は厚い吸音材、高周波は薄い吸音材を密にするとよい。図 20 はその例である。

2.6 機械関係

- 振動源となる機器類は、重くて頑丈な基盤の上に取り付けることが原則である。薄いドアよりも厚いドアの方がノックオンは小さいと同じ。
- 振動遮蔽材 発泡材 (ゴムやプラスチック)、ミネラルウール、多孔材、高密度材、コルク、水平型ワイヤーコイル、コイル、重ね板バネ、皿バネなどが知られている。図 21 に典型例を示す。図 22 は、ター

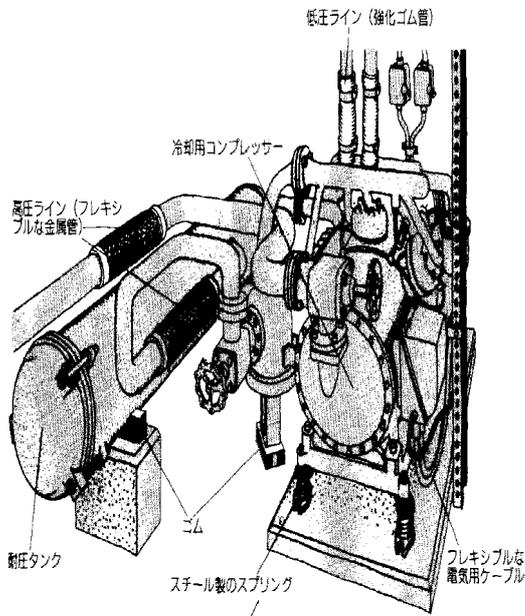


図 17: フレキシブル管は振動伝達の抑止に有益

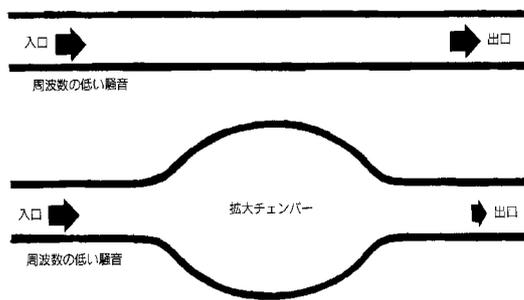


図 18: チャンバーは低周波を吸収しやすい

ビンの騒音を防音材で対策した例である。

- スプリングの注意点 図 23 にあるように、振動源はゴムやコイルバネが頻繁に用いられている。しかし、鋼製コイルバネは制振性がなく、共振しやすい。図 23 に見られるように、振動絶縁にコイルバネが頻繁に使われている。コイルバネは制振性能が小さいこともあるが、それ以外に、コイルバネとその上に載っている機器の固有振動数の問題も絡んでくる。

コイルバネに制振性がない場合、機械が振動してその機械固有の固有振動数近くになると共振が発生し、予想を超える大きな振動に増長し危険な状態をもたらす。機械の固有振動数より低い周波数と、それよりも高い周波数の振動それぞれは、前者は遮断できないが後者は可能である。制振性の高いコイル

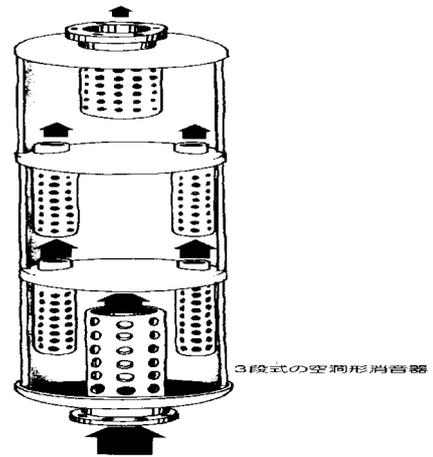


図 19: 空洞型消音器

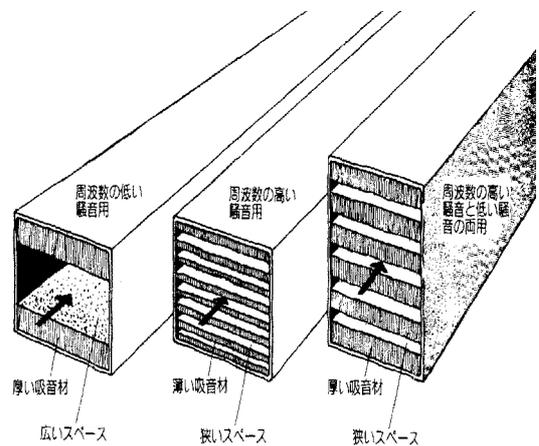


図 20: 充填型ダクト消音器

バネの場合、機械の固有振動数前後の振動は遮断できないとされている。

振動源からの振動が隣接する部位に伝達する大きさは、振動論でよく知られているように、次式で表される。

$$T_R = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta(\omega/\omega_n))^2}}{\sqrt{1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\zeta(\omega/\omega_n))^2}} \quad (1)$$

ここに、 T_R は伝達率、 ζ は減衰比、 ω は強制角振動数、 ω_n は固有角振動数である。伝達経路の境目に減衰機能のある機構や材料、たとえば、コイルバネ・ダッシュポット・ゴムなどを介在させ ζ を調整する。 ζ をいくつか与えた場合の T_R と ω/ω_n の関係を図 24 に示す。

これからわかることは、

1. 振動絶縁効果は $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ において現れる。

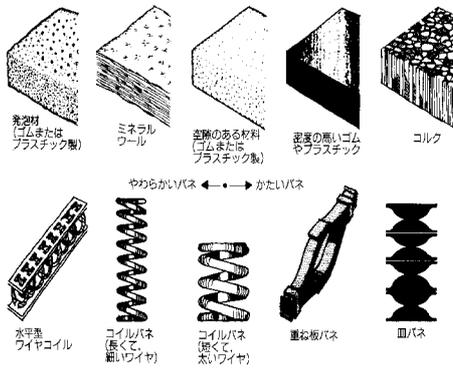


図 21: 防音材のいろいろ

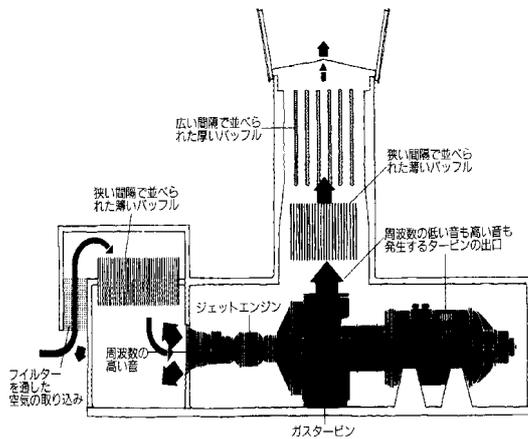


図 22: タービン騒音の消音ダクトによる対策例

したがって、固有振動数 ω_n が小さいほど効果が大きい。

2. $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ の領域では減衰比が大きいほど振動絶縁は劣化する傾向がある。制振の側から見れば、減衰比が大きくなるとともに $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ では効果が薄れる。したがって、妥協策として普通は $0.1 < \zeta < 0.15$ 程度になるように設計している。

結局、 $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ の範囲では振動絶縁器のバネ定数を極力小さくしてダンパーを除去すればよいことになるが、バネ定数が小さくなるにしたがい機械は不安定になる。このパラドックスは、コイルバネ自体には減衰能がほとんどないことに起因しているからである。もし、コイルに減衰能があれば事情は一変する。

M2052 製コイルは通常の鋼製コイルよりも格段低いバネ定数を求めることが出来るが、コイルの形

固有振動数の等しい4つの例

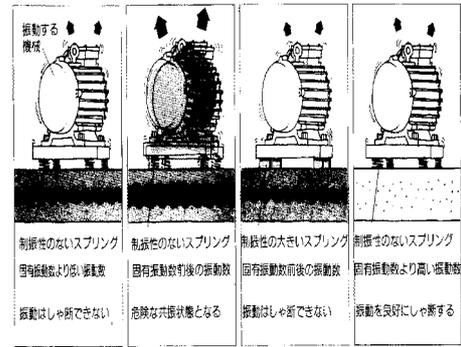


図 23: バネの固有振動数と制振性

状ではなくバネ定数の高い形状、たとえば、マウントの形状でも使うことが出来るから、このようなマウントで振動絶縁するのであれば上述したパラドックスから脱皮できる。すなわち、コイル状よりも強固で制振性も高い除振器具が成立し、「安定な支持と高い振動絶縁効果」の併せ持つ除振器具の創出が考えられる。

ゴムの場合は、金属バネやダッシュポットの場合とは異なり、損失係数 η を用いて次の式が妥当と考えられている [2] [5]。

$$T_r = \sqrt{\frac{1 + \eta^2}{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + \eta^2}} \quad (2)$$

これによれば、減衰比が大きくなるにつれて ω/ω_n の高いサイトで起こる伝達率の不利な面は生じない。防振ゴムを使用した場合には、図 25 のように、 $\sqrt{2} > \omega/\omega_n$ の範囲においても、損失係数が大きくなるとともに現れる振動絶縁効果の悪化はみられない。これがあるゆえに、防振ゴムは多用される側面もある。

M2052 合金もゴムと同様な利点を擁しており、金属でありながらゴムの長所が使える。すなわち、高減衰能の大きさを気遣うことはなく、その属性を有効に機能させられる。次の点はゴムに優る M2052 合金の特異点である。

1. 一般の金属製コイルバネ自体は制振性がほとんどないがこの合金は大きな減衰値を持っている。
2. ゴムは強度が非常に低く、「ぐらつき」や「おどり」の危惧を伴う。
3. 空気バネは設置に要する空間が巨大である。

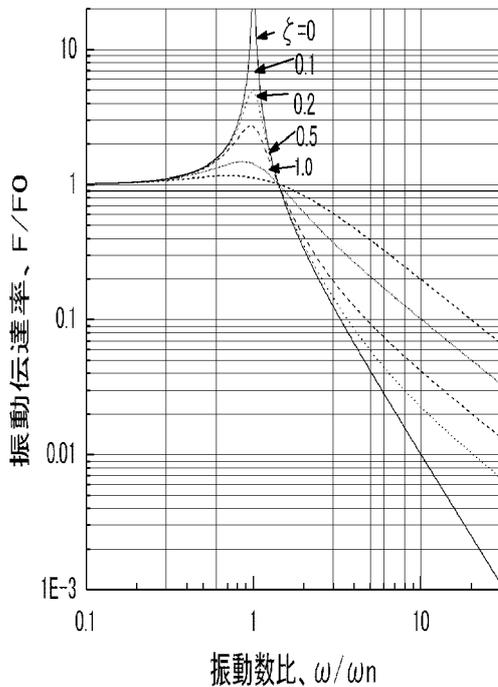


図 24: バネとダッシュポットを介する伝達率

M2052 合金はこれらの問題をクリアしている。この合金をコイルバネとして用いた場合の際立った利点がみられる。

- 工場内では機械は、図 26 のように基礎に直接取り付けるか、床は厚くして強固なものに設置する必要がある。ハンマー、電頭、2 階の強烈な振動源などは地盤に直接設置するのがよい。あるいは、図 27 のように、建物へ振動が伝達しないように基盤に直接設置することが望ましい。
- 振動数の低い機械の場合は床を強固にする必要がある。しかし、M2052 製のマウントはバネ定数を小さくすることによって 25Hz 近くの低周波の低減を達成している [6],[7]。また、ポンプの強力な振動加速度を U 字形に曲げた 4 枚の板によって大幅に低減させた例がある [8]。このようなバネ定数を低めることで低周波を低減する方法は、基盤を可能な限り剛にするという原理に反するものであり、時代の趨勢に逆行していると見られよう。しかし、上記の 3 つの事実は例のない新事例であり、今後に期待できると考えられる。

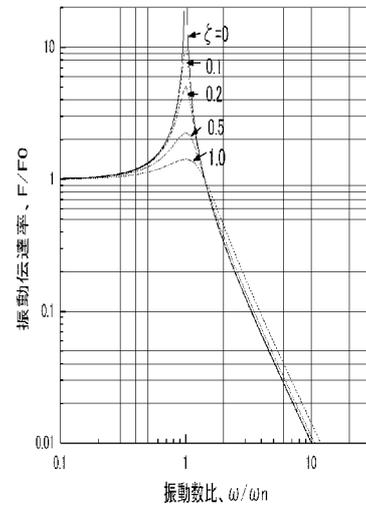


図 25: ゴムを介する伝達率

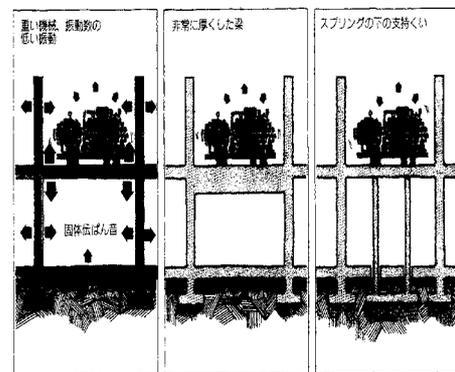


図 26: 床は強固か基盤につなげる

- 機械に不可欠なオイル、冷却水、電気などの導管に伝わる音はフレキシブル管がよい。M2052 はパイプが製造できるから、振幅の小さい振動はこの合金製パイプで除去が可能である。

2.7 建築関係

2.7.1 室内の対策

- 多孔質層 周波数の高いもの程よく吸収する。低周波吸収にはさらに厚さが必要。フェルト、発泡ゴム、発泡プラスチック、紡織繊維、金属やセラミックスの焼結体が使われる。穴が塞がると能力は落ちるから表面を保護する必要がある。100Hz 以下は厚さが

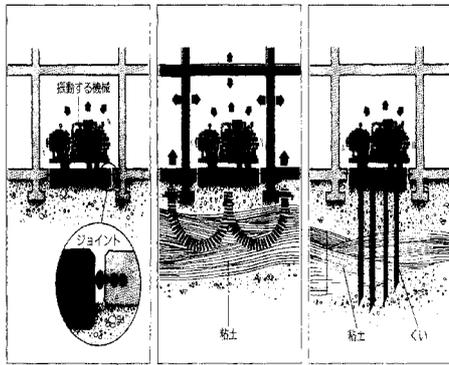


図 27: 建物への振動伝達を遮断

要求される。図 28 は、典型的な表面保護材料の例である。

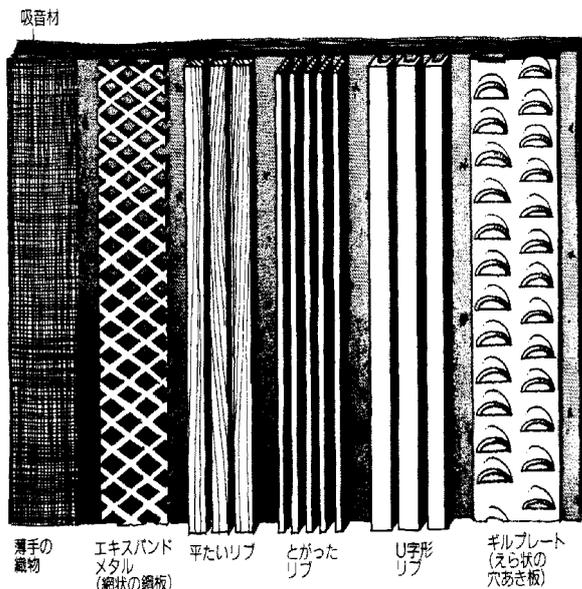


図 28: 代表的な表面保護材

- 防音壁 間柱 (壁に設置された柱) に取り付けられたパネルは周波数の低い音を吸収する。ただし狭い周波数領域でのみ有効。その領域はパネルの剛性と間柱間隔によって決まる。壁とパネルとの距離にも関係する。制振性の大きいパネルを使えば、吸収可能な周波数域は広がる。多孔質の吸音材は低周波吸収にはかなりの厚さが必要であり、不得手である。
- 防音衝立 周波数高い音は衝立で吸音できる。天井も吸音性材料を使うとなおよい。図??は、工場における衝立の具体例である。

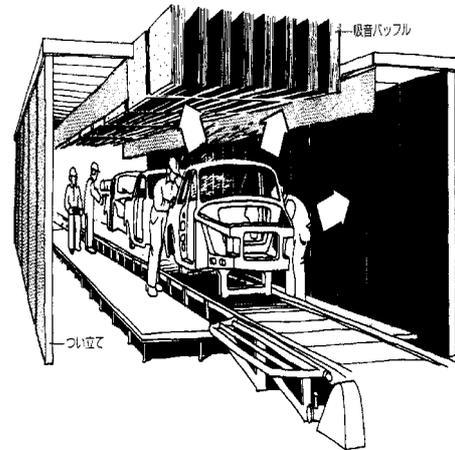


図 29: 工場の騒音対策の衝立例

2.7.2 遮音壁

- 遮音壁 重量が大きいほど透過損失は高い (透過によって吸収される率が大)。遮音カーテンには鉛入りがよく使われる。
- コインシデント効果 大きな板に音が入射した場合、音響インピーダンスの関係で、空気の質量と板の質量の比で板は振動する。このため板の単位面積あたりの質量が大きいほど振動は小さくなり、板の後面に放射される音は小さくなる。

遮音性を表示する方法に透過損失がある。垂直入射音に対する透過損失を T_0 、ランダム入射に対するそれを T とする

$$T_0(\text{dB}) = 20 \log_{10}(M * f) - 42.5$$

$$T(\text{dB}) = T_0 - 10 \log_{10}(0.23 * T_0)$$

となる。ここに、 M は板の面密度 (単位面積あたりの質量、 kg/m^2)、 f は周波数 (Hz) である。これは質量則と呼ばれている。すなわち、高い周波数ほど、ならびに、面密度が大きいほど透過損失は大きくなる。

遮音材を伝播する振動と板上を伝播する音の波が一致した場合、質量則よりも損失が小さくなる。この現象をコインシデント効果という。図 30 は、代表的材料のコインシデント効果を示す。

- 扉 扉を通り抜ける音量は少なく、多くの音は扉を回折する。前川によれば [9]、音源と受音点とを結ぶ直線距離と扉の上を通過していく距離との行路差を求め、半波長で割った値から現推量を求めると、音源もしくは受音点が地上より上にある場合は、地面

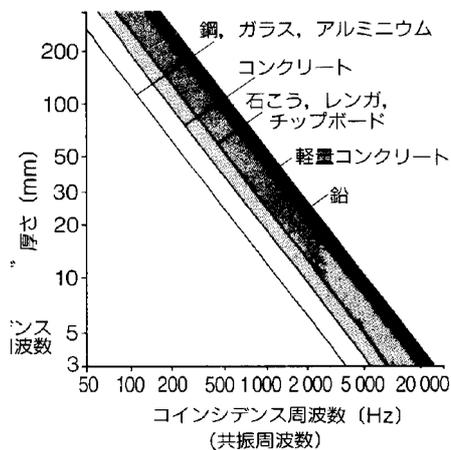


図 30: 主な建築材料のコインシデント効果

の反射の影響で効果が減り、低い周波数になるほど減少量は小さくなるという。

- 壁の質 厚い壁の透過損失は壁の硬さと重量で規定される。
- 壁の構造 2重にすると効果は大。板厚が大きいほど間隔は広いのがよい。

2.8 防音カバー

音の発生を防止できない場合は防音カバーで遮断する。遮音効率を上げるには、重く・厚みのある容器がよい。サンドイッチ材や鉛が使われているが、M2052はかなり有望である。

隙間があるとカバー効率は著しく低下する。M2052のパテはこの隙間を埋めることにかけて優れた性能を現す。密閉度が高まるとカバー内の温度が上昇するから、サイレンサーや、吸音型のダクト、膨張型のサイレンサーなどを用いて放熱対策を施す必要が起る。このような事態にこそ、換気口付きの M2052 防音カバーが有効と見られる。

防音カバーは、周波数が高い振動には効果的であるが、100Hz以下の低周波は吸収が難しい。しかし、M2052は低周波にも反応するから効果的である。東レは鉛遷移の防音カバーを発売しているが、M2052のそれのほうが優れた成果をもたらすと思われる。

2.9 吸音材の効果

室内に障害物がない大きな空間は音の響きが大きい。その空間は吸音性が小さいからである。グラス・ロック。スチールなどのウール状繊維や、カーボンファイバー、ポリウレタンなど、細かい隙間を多く持つ多孔質吸音材が吸音性が高くよく使われている。高温用には金属やセラミックスの多孔質材がある。M2052は繊維は無論、粉末もあるから焼結製品からの多孔質材も供給でき、この合金の今後が期待できる。

焼結アルミの多孔質材の実験によれば、吸音材の背後に空気の隙間を作ると透過損失は低周波域でも増加するという。

3 機械や装置の騒音対策

- 部位同士が衝突しないこと。
- 往復運動の方向転換は緩慢にすること。
- 金属部品をプラスチックに交換する。
- 騒音が大きい部分は囲う。
- 速度調整の際に騒音を発しないような動力伝達方式を採用すること。
- 透過損失の大きい、気密性の高いドアを機械に取り付ける。
- ジェット気流による冷却は避け、機械の放熱効率を上げる。
- 空気バルブの出口には消音器をつける。
- 油圧システムのポンプの形式を変更してみる。
- 換気システムのファンを静音型にし、ダクトに消音器を取り付ける。
- モータ、エアコンプレッサーなどに消音器をつける。
- 騒音源を切り離すか囲む。図 31 は、工作機械から発生する空気伝播音・固体伝播音に対する 5つの騒音対策である。(a) 換気装置の消音器、(b) 防音ゴムを挟んでアングル止具で固定、(c) 防振処理された機械の扉、(d) 扉の内面に張られた吸音材、(f) モータの消音器などである。
- 振動によるネジの緩みに注意する。
- 床への振動、あるいは床からの振動の絶縁に注意する。

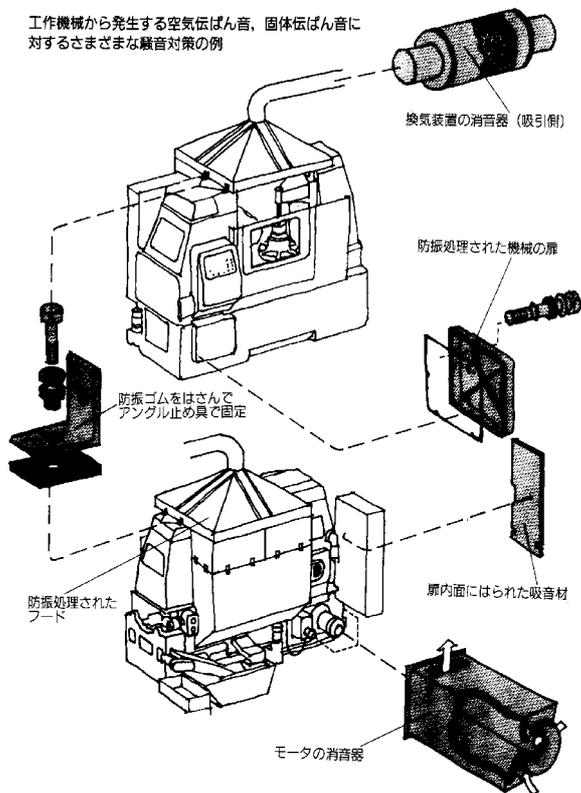


図 31: 5つの観点から騒音対策した例

ついでの研究」(榊セイシンと職業能力開発総合大
学校との共同研究)

[8] 川原浩司、「工業材料」2004年、2月 9月号の8月号

[9] 前川純一:音響学会誌、18(1962),No.4,187 196

参考文献

- [1] 山本剛夫監訳、現場の騒音対策 (アメリカ合衆国労働省労働安全衛生局編)、オーム社、1992年
- [2] A.L.Klosterman:On the experimental determination and use of modal representation of dynamic characteristics, Ph.D.dissertation,U.of Cincinnati,1971.
- [3] D.Brown et al.:Parameter estimation techniques for modal analysis,SAE,1979
- [4] 防振ゴム研究会編、新版防振ゴム、現代工学社、平成10年
- [5] 高橋康英編、実用振動解析入門、日刊工業新聞社、昭和59年
- [6] 中山健司、浜嘉夫、中村竜也浦野義匡、吉田喜一:機械学会北陸支部研究会,2001年,4月および、吉田喜一:金属、アグネ出版、2002年3月
- [7] 平成15年度創造技術研究開発事業報告書「平面研削盤の高精度化のための制振合金 M2052 の応用に