振動・騒音対策における材料設計手法の基礎

赤坂 修一

Fundamentals of Materials Design for Vibration and Noise Control

Shuichi AKASAKA (Department of Materials Science and Engineering, School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1-S8-43, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan) akasaka.s.aa@m.titech.ac.jp

Materials for vibration and noise control plays important roles in the realization of comfortable environment. The function of those materials are classified into vibration damping, vibration insulation, sound absorption and sound insulation. In order to effectively reduce the noise and sound level, appropriate materials must be arranged in products. This article explains the mechanism for vibration and noise control and fundamental knowledge for the design of each type of materials. In addition, this article introduces new materials for vibration and noise control; piezoelectric materials which can dissipate the vibration and noise energy at a certain frequency controlled by the inductance of the shunted electric circuits, and nanofiber non-woven sheets which exert high sound absorption performance without increasing the thickness.

(Received on May 8, 2016)

Key Words : Vibration Damping, Vibration Insulation, Sound Absorption, Sound Insulation

1. はじめに

古くから振動・騒音問題は、我々の身近な社会問題の一つであり、振動・騒音対策は、快適な生活環境、労働環境を実現するために必要不可欠な技術である。自動車や家電製品、工業機械において、低振動、低騒音は重要な製品性能の一つであり、振動源、騒音源の発生エネルギーを低減することが望ましいが、当然ながら製品本来の性能が優先されるため、適切な材料を配置することで、振動、騒音の低減がなされることが多い。低振動、低騒音を目指した製品設計において、重要となるのは、後述する制振、防振、吸音、遮音をどのような設計思想で適用するかである。誤って使用すれば、振動、騒音を低減できないばかりか、逆に増加させてしまう場合もある。また、材料設計においても、それぞれ材料の要求される物性が異なるため、どのようなメカニズムで、どの対策技術に向けた設計を行うかを明確にする必要がある。

そこで本稿では、振動・騒音対策材料の設計に必要な基

礎知識について説明するとともに、著者が行っている研究を紹介する。

2. 振動・騒音低減技術

Figure 1に振動・騒音低減技術の分類を示す。低減技術は大きく、エネルギー吸収、エネルギー反射（伝搬の低減）、増幅の抑制に分類される。振動の場合、エンジンやモーターなどの振動源で生じた振動は、支持体を通して伝搬し、筐体を振動させる。そのため、振動低減技術には筐体での振動を低減することが求められる。振動源もしくは筐体の振動エネルギーを低減するのが「制振」であり、筐

赤坂 修一：東京工業大学物質理工学院材料系（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1-S8-43）助教。博士（工学）。平成17年、東京工業大学大学院 理工学研究科 物質科学専攻 博士後期課程修了。専門は、制振・防振材料、吸・遮音材料、衝撃吸収材料、圧電性高分子材料。日本ゴム協会関東支部 副支部長、制振工学研究会 幹事・材料技術分科会主査・振動音響解析WG主査、繊維学会ナノファイバー技術戦略研究委員会幹事。

Figure 1 振動・騒音低減技術の分類

Figure 2 材料による音の反射・吸収・透過

体への振動伝搬を低減するのが「防振」である。一方、音の場合、音源から放射された音波は空气中を伝搬し、観測点において検知される。伝搬経路に材料がある場合、入射した音のエネルギーは、反射音と吸音と透過音のエネルギーに変換される。Figure 2に材料に音が入射した際の音の反射、吸収、透過の模式図を示す。なお、図中の I_i 、 I_r 、 I_a 、 I_t は、それぞれ入射音、反射音、吸音、透過音の音響インテンシティ (W/m^2) であり、音波の進行方向に垂直な面上の単位面積を単位時間を通して音波のエネルギーを表す。ここで、反射音のエネルギーを低減するのが「吸音」であり、その指標である吸音率 (α) は以下の式で定義される。

$$\alpha = 1 - \frac{I_r}{I_i} \quad (1)$$

この定義によれば、材料があると想定している場所に材料がない場合（開けた窓など）、入射音はすべて透過音となり、吸音率は1になるが、吸音率の測定や実際の施工においては、材料背後に剛体（壁や筐体）があり、透過音は剛体で反射して再び材料中を伝搬した後、反射音として振舞うので、結果として吸音性能を評価していることになる。背後に剛体がない場合は注意が必要である。一方、透過音のエネルギーを低減するのが「遮音」である。入射音と透過音の音圧レベルの差を表す、透過損失 (TL) が指標として用いられ、以下の式で定義される。

$$\text{TL} = 10 \times \log_{10} \frac{I_i}{I_t} [\text{dB}] \quad (2)$$

値が大きいほど、遮音性が高いことを表す。例えば、観測

者が家の中にいるときに、家の中で発生する音を低減させるのが吸音であり、家の外からの音を低減させるのが遮音である。また、騒音源を含む製品で例えると、発生した騒音のエネルギーを筐体内部で吸収するのが吸音であり、筐体外部に透過させないのが遮音である。これらの吸音、遮音は、音源から空气中に放射された音に対する対策であるが、振動源や振動が伝搬した部品、筐体などが音源となることが多いため、前述の制振・防振を行うことで音源からの放射音のエネルギーを低減することも効果的である。そのため、本特集のテーマに含まれる「防音」は、吸音、遮音に加えて、制振、防振も適用して騒音を防ぐという意味で使われることが多い。

さらに共振、共鳴を生じると、振動、音のエネルギーが著しく大きくなることから、共振、共鳴を生じない製品設計が必要となる。

3. 振動対策材料

3.1 制振材料

制振材料は主として、材料の粘性を利用し、振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、散逸することで振動エネルギーを低減する。

材料の制振性能の評価法は、共振法、強制振動法、波動伝搬法などいろいろとあるが、測定の簡便さから動的粘弾性測定 (DMA) が用いられることが多い。Figure 3に弾性体、粘弾性体に振幅が γ_0 の正弦歪を印加した際の歪-応力曲線の模式図を示す。弾性体は、正弦歪と同位相の応力成分のみを生じるため、原点を通る直線となる。一方、粘弾性体は、正弦歪と同位相の応力と粘性由来の位相が $\pi/2$ ずれた応力が発生するため、ヒステリシスループを示す。最大歪の時の応力 (σ_1)、歪が0の時の応力 (σ_2) を γ_0 で除した値がそれぞれ貯蔵弾性率 (E')、損失弾性率 (E'') である。また、ヒステリシスループの内部の面積が1サイクル中のエネルギー損失量 ($W[\text{J}]$) に相当し、歪振幅と損失弾性率を用いて、 $W = \pi \gamma_0^2 E''$ の関係を持つ。このことは、歪が等しければ E'' が高いほどエネルギー損失量が大きいことを意味している。一方で、材料に入力されたエネルギーは、一部が損失されるが、残りは貯蔵されるた

Figure 3 弾性体、粘弾性体の歪-応力曲線

め、エネルギー損失量の絶対値よりも貯蔵エネルギーとの相対量として評価したほうがよく、制振性の指標として、 $\tan \delta (=E''/E')$ が推奨されている。

高分子材料の場合、緩和領域（特にガラス転移）において $\tan \delta$ がピークを示すため、特定の温度・周波数において、高い制振性を示す。そのため、制振材料の設計の上では、実際に使用する温度範囲において、対象とする振動の振動数付近にガラス転移があることが重要である。また、ピークがシャープだと温度変化に対して制振性が変化しやすいため、ピークはブロードなことが望ましい。ピークの位置は分子の平均的な運動性、ピークの幅は分子運動性の幅（不均一性）が関与するため、分子量や分子量分布、分子構造、可塑剤・充填剤の添加、架橋構造の導入、ポリマーブレンド、共重合などにより所望の特性が得られるよう材料設計を行う。

エネルギー損失の主因である粘性は内部摩擦に由来するため、エネルギー損失を向上するためには、分子内、分子間や添加した異分子との摩擦を増加させる機構を導入するか、粘性以外のメカニズムを導入することが有効である。

近年、ポリロタキサンにおいて、スライディング転移と呼ばれる、構造由来の緩和がガラス転移よりも低周波数（高温）側に観測され、スライディング転移とガラス転移の間の幅広い周波数範囲で高い制振性を示すことが報告されている¹⁾。

また、著者らは、圧電性高分子であるポリフッ化ビニリデン (PVDF) に電気回路を接続し、PVDFの電気的インピーダンスを最適化することで、圧電性により生じた電気的エネルギーを効率よく損失し、材料全体のエネルギー損失が向上することを報告した²⁾。

Figure 4にPVDFに電気回路としてインダクタンスを接続した際の貯蔵、損失弾性率の周波数依存性を示す。インダクタンス接続の系では、PVDFのキャパシタンスと電気回路のインダクタンスから決まる電気的共振周波数 (f_0) において、エネルギー損失が最大になる。図中の横軸は、

Figure 4 電気回路（インダクタンス）を接続したPVDFの貯蔵、損失弾性率の周波数依存性

測定周波数 (f) と f_0 の比の対数であり、縦軸は、それぞれ貯蔵、損失弾性率の電気回路未接続の値に対する比を示している。なお、測定周波数は10 Hzとし、インダクタンスの値を変えて、 f_0 を変化させながら、室温で測定を行った。 f_0 において、損失弾性率が著しく増加した。一方、貯蔵弾性率は共振現象特有の挙動が観測されるが、最大でも5%程度の変化で、 f_0 では未接続と同じ値を示した。これは、 f_0 において、 $\tan \delta$ も大きく向上していることを示している。また、この系は、インダクタンスによって f_0 をコントロールできるため、貯蔵弾性率（硬さ）を変化させず、任意の周波数のエネルギー損失のみを向上できることを表している。

このように、粘性以外のエネルギー損失の機構を導入することで材料全体のエネルギー損失を向上することができる。

3.2 防振

防振材料は、振動源が生じる振動エネルギーの伝搬を抑制する材料であるため、振動源から防振材料を通して対象物に伝わった力もしくは変位の割合を表す振動伝達率 (λ) が指標として用いられる。ここで、振動源を表すマス (m) と防振材料を表すバネ (k)、ダッシュポット (c) からなる一自由度粘性減衰系を考えると、振動源の力の振幅 (F_0) と対象物（支持体や筐体など）に伝わった力の振幅 (F_t) から、振動伝達率は以下の式で表される。

$$\lambda = \frac{F_t}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\beta)^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \quad (3)$$

ここで、 β は角振動数比であり、不減衰振動系（マスとバネで構成される振動系）における固有振動数 $\omega_n (= \sqrt{k/m})$ を用いて、 $\beta = \omega/\omega_n$ と表される。また、 ζ は減衰比であり、臨界減衰係数 $c_c (= 2\sqrt{mk})$ を用いて、 $\zeta = c/c_c$ で表される。

Figure 5に減衰比をパラメータとした際の一自由度粘性減衰系の振動伝達率の角振動数比依存性を示す。防振効果を発現するためには、振動伝達率が1以下である必要があ

Figure 5 減衰比の異なる一自由度粘性減衰系の振動伝達率の角振動数比依存性

り、小さいほど高い防振効果を示す。 $\beta \ll 1$ では $\lambda = 1$ であり、防振効果を示さない。 $\beta = 1$ 付近では共振を示し、振動伝達率は著しく増加し、加振力を超える力が伝達される。この領域では減衰比が高いほど λ は低下する。 $\beta = \sqrt{2}$ では、減衰比に関わらず $\lambda = 1$ となり、 $\beta > \sqrt{2}$ において $\lambda < 1$ となり防振効果を発現するため、 $\beta > \sqrt{2}$ になるような材料を配置する必要がある。また、この領域では、減衰比が小さいほど、また角振動数比が高いほど、振動伝達率が小さくなるため、減衰比が小さく、角振動数比が高い状態が望ましい。しかし、どちらも振動源の質量が影響するため、振動源の質量を含めた設計が必要となる。材料設計の面では、より柔らかい(k が小さい)、減衰比が低い(c が小さい)ほど高い防振効果を示すことになるが、前者は、重量物を支えられない、静たわみが大きくなるといった問題があり、後者は、運転開始時、停止時に低周波数側のある共振状態を通過し、振動伝達率が大きくなるため、複合的な検討が必要となる。

4. 騒音対策材料

4.1 吸音材料

吸音材料は大きく三種類に分類される。Figure 6に吸音材料の種類と吸音特性を示す。多孔質型は、グラスウールやウレタンフォームなど繊維状の材料や連続気泡を含む通気性のある材料であり、材料内を音波が通過する際に、主に材料内の空気粘性、母材(繊維など)との摩擦によってエネルギー損失を生じ、吸音を示す。高い周波数域において、幅広い周波数範囲で吸音を示し、軽量で安価なため、幅広い分野で用いられている。

多孔質型吸音材料の音響特性の予測のため、Delany-Bazley³⁾(もしくはDelany-Bazley-Miki⁴⁾)モデルや等価流体モデル⁵⁾、Biotモデル⁵⁾など様々な音響モデルが提案されている。波動理論により、材料の特性インピーダンス(Z_c)と伝搬定数(γ)が与えられれば、材料の音響特性を導くことができるため、上記の音響モデルは、材料の特性インピーダンスと伝搬定数を導くために用いられる。特性イン

ピーダンスは、音圧(p)と粒子速度(u)、実効密度(ρ)、音速(c)と以下の関係があり、音圧が印加された際の粒子の動きにくさを表している。

$$Z_c = \frac{p}{u} = \rho c = R + jX \quad (4)$$

ここで、 R 、 X はそれぞれ音響抵抗と音響リアクタンスである。

また、伝搬定数は、単位距離離れた二点の音圧 P_1 、 P_2 から以下の式のように表される。

$$\gamma = \log_e \frac{P_1}{P_2} = \alpha + j\beta \quad (5)$$

ここで、 α 、 β は減衰定数、位相定数と呼ばれ、それぞれ単位距離進む間に生じる減衰と位相の変化を示す。

Delany-Bazleyモデルは、数多くの繊維材料の空気流れ抵抗(σ)と特性インピーダンス、伝搬定数を計測し、その関係を表した経験式である。空気流れ抵抗のみで算出できるため、計算が簡単で、多孔度が高く、迷路度(空気の伝搬経路の試料厚に対する比)が1に近い材料では、よく一致するため、繊維材料において幅広く用いられている。また、等価流体モデル、Biotモデルは、多孔質材料の複雑な内部構造とその影響を複数の音響パラメータにより表現した、より現実の材料の構造に近いモデルである。等価流体モデルは空気伝搬音を、またBiotモデルは、空気伝搬音と固体伝搬音、その相互作用を考慮したモデルである。

前述のとおり、多孔質型吸音材料は幅広い周波数で高い吸音率が期待できるが周波数域が高い。厚さが増すにつれて、全周波数域の吸音性能が向上するため、より低周波数側でも吸音を示すが、厚みの増加は、施工や輸送の面で望ましくない。例として、Figure 7に48 kg/m³のグラスウールの垂直入射吸音率の厚み依存性を示す。著者らは、比表面積を大きくし、空気と母材との摩擦を増加させることで、薄くても、吸音性能の優れた材料を得るため、ナノファイバー吸音材料の研究を行っている。Figure 8にグラスウールと同じシリカを主成分とした、シリカナノファイバーの垂直入射吸音率を示す⁶⁾。ナノファイバーは、直径が

Figure 6 吸音材料の種類と吸音特性

Figure 7 グラスウール(48kg/m³)の吸音率の厚み依存性

1 μm 以下の繊維であるが、図中には、1 μm を超える材料も含まれている。また、比較のためにグラスウール (48 kg/m^3) も併せて示す。サンプルはすべて約3 mmとしている。Figure 7に示した通り、グラスウールは幅広い周波数域で高い吸音率を示すが、測定した周波数範囲において、厚さ3 mmでは吸音率が低く、ほとんど吸音しない。一方で特に平均繊維径が2.35 μm 以下のシリカファイバー (SF1-3) は高い吸音率を示しており、薄くても十分な吸音性能を持つ材料が得られた。また、平均繊維径が小さくなるほど、高い吸音率を示している。SF1とSF2で逆転しているが、これはサンプル厚さの違いによるものである。この高い吸音性能は、比表面積の増加に加えて、繊維径の減少により剛性が低下し、音波によって繊維が振動しているためと考えている。

共鳴器型は、ヘルムホルツレゾネータが基になっている吸音材料である。ヘルムホルツレゾネータは、丸形フラスコのような形状をしており、首の部分が質量、胴の部分がバネとして働き、共振系を形成するため、固有振動数と同じ周波数の音波が入射すると、首の部分の空気が著しく振動し、壁面との摩擦によりエネルギー損失して吸音を示す。一般的には、Figure 6にあるような有孔板、もしくはスリット板とその背後の空気層から構成される。音楽室やスタジオの小さな孔が開いている壁を思い出していただくと思われやすいと思う。この吸音材料は中周波数域に共振に由来する中程度の吸音ピークを示す。また、背後の空気層に多孔質材料を入れると吸音率は向上する。また、孔のサイズを μm オーダーにしたMicro perforated panelを用いることで高い吸音率を示すことが報告されている⁷⁾。吸音性能や固有振動数が寸法で決まるため、材料設計の余地は小さい。

板・膜振動型は、非通気性の板・膜と背後空気層から構成される。音波の入射により、板・膜が振動し、材料の内部摩擦によってエネルギー損失し、吸音を示す。材料の剛性と背後空気層のバネによって決まる固有振動数で大きな振動振

Figure 8 シリカナノファイバー (3 mm厚) の吸音特性

幅を示すため、比較的低周波数域に高い吸音率を示す。

前述の制振材料同様、材料のエネルギー損失が影響するため、著者らは、電気回路を接続したPVDFを吸音材料に適用する研究を行っている。Figure 9に電気回路としてインダクタンスを接続したPVDFをポリメチルメタクリレート (PMMA) に貼り付けた積層板の垂直入射吸音率を示す⁸⁾。電気的共振周波数は、561 Hzとした。本積層板は、板・膜振動型吸音材料であるため、材料と空気バネから決まる固有振動数において高い吸音率を示す。そのため、電気回路未接続の状態590 Hzに吸音ピークが観測された。電気回路を接続した状態では、未接続での値に対して、561 Hzに新たに吸音ピークが現れた。そのため、本システムが吸音材料としても有効であることが確認された。電気的共振周波数は、インダクタンスによってコントロールできるため、本材料は特定の周波数の音のみを吸収する、これまでにない吸音材料となる可能性がある。

4.2 遮音材料

非通気性の板材料に音波が入射すると、材料が振動し、新たな音源として、背後に音波を放射する。これが板材料における透過音である。そのため、遮音性能 (透過損失) を向上させるためには板材料の振動を抑えることが重要となる。

Figure 10に制振性能の異なる単板の音響透過損失 (TL)

Figure 9 電気回路 (インダクタンス) を接続したPVDF/PMMA 積層板の垂直入射吸音率

Figure 10 単板の音響透過損失

の模式図を示す。低周波数側から剛性制御領域、板共振領域、質量制御領域に分類され、特定の周波数において、コインシデンス効果が表れる。剛性制御領域では、材料の剛性が優位であり、剛性が高いほど高い透過損失を示す。これを剛性則という。1オクターブあたり-6 dBの勾配で減少する。板共振領域では、材料の低次の固有振動が生じており、共振・反共振に伴い、透過損失が波打ったような形状になっている。制振性能を向上することで共振による振幅の増幅を抑制できるため、制振による対策が有効である。質量制御領域では、材料の質量（面密度）が優位であり、面密度が高いほど高い透過損失を示す。これを質量則という。1オクターブあたり5～6 dBの勾配で増加する。経験的には、周波数（ f ）と面密度（ ρ_s ）を用いて、以下の式が成り立つ。

$$TL = 18 \log(f \cdot \rho_s) - 44 \quad (6)$$

また、板の曲げ振動の波長と斜入射した音波の波長が一致すると、共振し、板の振動を増幅するため、透過損失が著しく増加する。これがコインシデンス効果である。コインシデンス効果よりも高い周波数域でも質量則に依存するが、コインシデンス効果による透過損失の低下が大きいと、それ以降の透過損失も低下する。制振性能を向上することで共振による振動振幅の増幅を抑制し、コインシデンス効果による低下を減少できるため、単板の材料の制振性能を向上させるほか、内層に制振性能の高い材料をサンドイッチした積層板とすることが有効となる。

一般に遮音材が使用される周波数域は、質量制御領域になるため、面密度の高く、またコインシデンス効果を抑制するため制振性能の高い材料が用いられることが多い。

5. お わ り に

本稿では、振動・騒音対策として、制振、防振、吸音、遮音材料のメカニズムと材料設計の考え方について説明した。基礎的な内容が多く、振動・騒音に関連した製品設計、材料設計に携わっている方々には物足りない内容であったかもしれないが、より多くの方々に振動と音、エネルギー吸収とエネルギー反射（伝搬の低減）のそれぞれでメカニズムが異なり、材料に要求される性能が異なることをご理解いただき、今後の材料設計に生かしていただければ幸いである。

References

- 1) Kato, K.; Ito, K.: *Soft Matter*, **7**, 8737-8740, (2011)
- 2) Akasaka, S.; Asai, S.; Sumita, M.; Date, M.: *Zairyo no Kagaku to Kougaku*, **44**, 5, 189-194 (2007)
- 3) Delany, M. E.; Bazley, E. N.: *Applied Acoustics*, **3**, 105-116 (1970)
- 4) Miki, Y.: *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, **11** (1), 19-24 (1990)
- 5) Allard, J. F.: "Propagation of Sound in Porous Media : Modeling Sound Absorbing Materials (2nd ed.)", Elsevier Applied Science (2009)
- 6) Akasaka, S.; Kato, T.; Matsumoto, H.; Asai, S.: *Nippon Gomu Kyokai Nenjitaiikai Yoshishu*, 58 (2014)
- 7) Maa, D-Y: *Scientia Sinica*, **17**, 55-71 (1975)
- 8) Otomo, S.; Akasaka, S.; Asai, S.: *Nippon Gomu Kyokai Nenjitaiikai Yoshishu*, 38 (2014)

日本語表記参考文献

- 2) 赤坂修一，浅井茂雄，住田雅夫，伊達宗宏：材料の科学と工学，**44**，5，189-194 (2007)
- 6) 赤坂修一，加藤高久，松本英俊，浅井茂雄：日本ゴム協会年次大会要旨集，58 (2014)
- 8) 大友俊輔，赤坂修一，浅井茂雄：日本ゴム協会年次大会要旨集，38 (2014)

*

*

*

*

*