

音と振動の制御に関する話題*

瀬戸邦穂 (佐賀大学理工学部)

1. はじめに

音と振動は同じか、違うか？

同じとも言えるし、違うとも言える。厳密には音は振動の一種であるが振動は必ずしも音ではない。音は空気の振動である。

これに似たものに波または波動がある。波動は音や振動を総称したものである。

波動と波は大体同じ意味である。波は元々、水面の高低運動、波浪を意味していたが水面に限らずすべての高低のある運動にまで広く用いられようになった。音波、熱波、衝撃波、秋波などの用語がある。秋波とは、もともと秋の澄みわたった水波のことであったが、転じて美人の涼しい目元を指すようになり、やがては媚びを表す目つき、いろめの意味に転じ、秋波を送るなどという表現が生まれた。

山脈と書いてやまなみと読ませることがある。広辞苑によると脈とは①物のつづき、つながり、山脈、文脈②生物の体液が運行する管③脈拍の略とあるが、波形と関係があるのではないだろうか。

さて、音も振動も波動の一種である。では、音と音波は同じか、違うか？

2. 音の性質

波動とは物体の表面の高低運動が次々と周囲は伝播していく現象のことであるが、音波とは、一部の空間の伸び縮みする現象が次々と周囲に伝播する現象のことである。このような波を弾性波という。男性に対して女性がいるように、弾性(力学)に対して塑性(力学)という用語があるが塑性波というものはない。弾性とは、物体が力を受けて変形しても、力を取り除くと元の状態に戻る性質である。この元に戻る力、復元力が波動や振動をもたらす重要な役割を担う。従って復元力をもたない、塑性波というものは基本的にありえないわけである。ただし、不連続体の波動的運動、例えば渋滞時の車の動き等は弾性波ではない。また、光や電波も波の一種であるが弾性体の中を伝播するわけではないので弾性波ではない。

音波とは、固体、液体、気体などを伝わる弾性波である。顔の皺にも、たてじわ、よこじわがあるように、波は大きく分けて、縦波と横波がある。縦波が波の進む方向に振動するのに対し、横波は進行方向と直角に振動する。音波は縦波であり、水面の波やギター弦の振動は横波である。また、地震の波は縦波と横波が混在し、レーリー波という波も知られている。これも横波の一種である。(光では縦波、横波という概念は

意味をなさない)。

音とは音波によって生ずる聴覚的現象すなわち音波を耳が感知する感覚のことである。従って音の評価は必ず感情や主観に作用される。

音波(振動)の要素には、周波数(振動数)、強さ(振幅)および音色(振動モード)がある。周波数の大きい音波は高い音として感知される。

周波数(振動数)とは、1秒間に何回同じ現象が繰り返されるかの回数であり、単位には Hz (ヘルツ) が用いられる。その逆数が周期である。周期の単位は秒であり、一つの振動の時間的な長さである。振動数は回転運動の回転数と同じ意味合いがある。1回転は角度 360 度あるいは 2π ラジアン (rad) のことであるので、振動数に 2π を掛けた物を角(円)振動数と呼ぶ。

一つの波の長さを表す用語が波長である。波長の逆数に 2π を掛けたものを波数という。波長は 1 周期 ($1/f$) に進む波の長さであり、1秒間に進む波の長さすなわち、周波数または振動数と波長との積を波の伝播速度、厳密には位相速度という。

したがって

$$c = f\lambda \quad \dots \dots (1)$$

の関係を得る。ここで c は位相速度を表す。

位相速度の大きさは気体であれば、絶対温度の平方根に比例し、棒などでは弾性率割る密度の平方根に比例する。

弾性波等の波は、媒質の物性値、気体であれば密度や圧力、固体であれば弾性率、断面二次係数、密度、断面積等が同じであれば同じ伝播速度をもつが、水面の表面の波である表面波の速度は波長により伝播速度が異なる。このように波長によって波の伝わる速度の異なる媒質を分散性の媒質といい、そのために起こる現象を一般に分散という。

いま、分散性の媒質中を伝わる平面波を考える。波の進む方向を x 方向とし、任意の時刻における波の形を $\xi = f(x)$ とするとき、その後の波形はどうなるであろうか。これを調べるには $f(x)$ を

$$f(x) = \sum_k a(k) \cos(kx + \alpha) \quad \dots \dots (2)$$

のように、いろいろな波長 $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ をもつ正弦波の

重ねあわせとして表すのが便利である。ここで k は波数を意味する。各成分はそれぞれの波長に対する速さ $c(k)$ で進んでいく。したがって時間がたつと各成分波はしたいにずれを生じ、それらを合成した結果はもとの波長を与えない。すなわち、分散性の媒質を伝わる波は時々刻々その姿を変えていく。ただ速さ $c(k)$ が k に無関係である場合、いかえれば分散のない場合に限って成分波間のずれは起こらず変形もない。

$f(x)$ がある限られた区間だけで (0 以外の) 値をとるとき、これを波のかたまりまたは波の群という。水面に石をなげこんだときにできる山と谷が数個ある輪形の波がその一例である。分散性媒質における波の群は一般にしたいに広がっていくが、群全体としてはたいに決まった速さで動いていく。この速さは群速度と呼ばれ、正弦波の位相の進む速度である位相速度とは異なる。

波によってエネルギーが運ばれる場合、エネルギーは波のかたまりの部分にあると考えられる。したがって群速度は波のエネルギーの伝わる速度として重要な物理的意味をもつのである。群速度を求めるためには、波長の僅か異なる二つの正弦波の重なりを考えればよい。成分波を

$$\xi_1 = a \sin(k_1 x - \omega_1 t),$$

$$\xi_2 = a \sin(k_2 x - \omega_2 t)$$

とすれば、重ね合わせの結果は

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2a \cos(\delta k \cdot$$

$$x - \delta \omega t) \sin(kx - \omega t) \quad \dots \quad (3)$$

となる。ただし

$$\frac{k_1 + k_2}{2} = k, \quad \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega, \quad \frac{k_1 - k_2}{2} = \delta k,$$

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = \delta \omega \quad \cdot (4), (5), (6), (7)$$

とおいている。

これよりなりと同じ式であり、 \cos の項はゆっくり変化する振幅とみなせる。

この場合、2つの正弦波の振幅が等しいため、重ね合わせた波にも振幅0の部分がある。隣りあう零点の間は近似的に一つの波の群と見られるが、その進む速さ v_g は

$$v_g = \lim_{\delta \omega \rightarrow 0} \frac{\delta \omega}{\delta k} = \frac{d\omega}{dk} \quad 2$$

である。これが群速度である。 $\omega = ck$ の関係がある

$$\text{から } v_g = \frac{d}{dk}(ck) = c + k \frac{dc}{dk} = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda}$$

である。

$$(k\lambda = 2\pi,$$

$$\frac{d(k\lambda)}{dc} = k \frac{d\lambda}{dc} + \lambda \frac{dk}{dc} = 0, \therefore \frac{d\lambda}{dc} = -\frac{dk}{kdc},$$

$$\therefore -k \frac{dc}{d\lambda} = -\lambda \frac{dc}{d\lambda})$$

重力波 ($c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ 、 g は重力加速度) のときは

$$v_g = \frac{1}{2}c, \text{ 表面張力波 } (c = \sqrt{\frac{2\pi\gamma}{\rho\lambda}}, \gamma \text{ は表面張}$$

力、 ρ は密度) の時は $\frac{3}{2}c$ となる。ちなみに、津波

の速さは \sqrt{gh} であり、波長に依存しない。

3. よい音悪い音

音は音波が、聴覚に作用して、脳が知覚するものであるから、同じ音波でも受け取られかたはさまざまである。しかし、一般的に人に好まれる音と嫌われる音、どちらでもない音がある。大多数の人に嫌われる音に騒音がある。騒音の定義は好ましからざる音すなわち邪魔な音、うるさい音である。

逆に、よい音としては、上手な演奏者による楽器の音、上手な歌手の歌声、必要な情報を知らせてくれる音、好ましいものや人の音や声、心を落ち着かせたりやすらぎを与える音などがある。

騒音になる音は、T.P.O に欠けるすべての音であるが、一般的特徴として大きな音は騒音になりやすい。「大きいことはいいことだ」、「大は小をかぬる」とか言ってどちらかといえば大きいことがもてはやされるが、音については大きすぎるのはひんしゆくものである。もっとも、講演とか講義では小さすぎる音も困りものである。

では、音を聞く必要がないときは周りの音は小さい方がよいのかというと、ある程度までは、静かな方が心が落ち着くが、完全に音が遮断されると返って落ち着かなくなる。たとえば無響室の中に入ると何か穴蔵にでも入ったようで不安になりおちつかないことが多い。しかし、いずれにしても、音が小さすぎて騒音問題が発生することはない。現に騒音レベルは音の大きさだけを問題にしている。そこで、音の大きさについて考えよう。音波はもともと媒質の伸ひ縮みが周りに伝わる現象であるが、気体が伸ひ縮みをすると圧力や密度は変化し、その圧力変化を耳が知覚する。音の圧力を音圧というが、音圧も大気圧も元々は同じ物である。同じ物を指して音圧といったり大気圧と言ったり

している。大気の圧力の平均値がいわゆる大気圧であり、平均からの変動が音圧である。したがって、音圧は変動圧力の振幅に関係している。この変動は1つの正弦波のようにきれいな振動ではない。時間によって、振幅が変化する。変化するものの代表としてよく平均値が用いられる。変動する音圧の大きさも平均値で表したら良いと考えられるがこの場合は適当でない。なにしろ、平均値からのずれが音圧であるから平均したら0に戻ってしまう。そこでどうするか？

1つは絶対値の平均を取る方法が考えられるが、同じ効果のある方法として二乗平均を利用する方法がある。実は圧力等の振幅の二乗はエネルギーの大きさに比例することが分かっており、数学的な取り扱いの厄介さだけでなく、物理的な意味も含めて時間的に変動する物理量に対しては二乗平均値が採用される。たとえば、 $\sin \theta$ の一周期の二乗平均値は $1/\sqrt{2}$ である。これは振幅1に対する値である。平均値が 100V であるということは、実際の振幅はその $\sqrt{2}$ 倍すなわち 141V になることはよく知られている。

では、このようにして計った音圧の実際の大きさほどの程度であろうか。そこで、人が聞き取れる音の大きさについて考えよう。人の耳の聞き取れる音の周波数の範囲が限られている。これを可聴周波数範囲とよびこれより高い音を超音波、低い音を超低周波音ということによく知られている。可聴周波数範囲は普通 20Hz から 20kHz とされているが個人差もあり、音の大きさによっても異なる。20Hz から 20kHz を波長に換算すると大体 1.7cm から 17m にわたるが、これは人の生活、活動や環境にもっとも関係の深いものの大きさであることが明らかである。これらの周波数の中でも人の耳は 4kHz 付近の音にもっとも敏感である。一方低周波に対しては、比較的鈍感であり、例えば 30Hz の音が 4kHz の音と同じ大きさに聞こえるためには、音圧は 1000 倍位大きくなければならない。いま音の大きさを単位面積当たりの音のパワー(馬力)で表す。単位は w/m^2 である。1kHz の音を標準にとり $10^{-12}w/m^2$ の 1kHz の音を最小の音の大きさと決める。これは音圧にすると 2×10^{-5} Pa であり、1気圧が約 10^5 Pa であることを考えるとその微弱さがわかる(100 億分の 1 気圧)。また、耐え得る最大の音の強さは $10w/m^2$ であり、これは音圧 63Pa に相当する。音の大きさは音のパワー(単位時間当たりのエネルギー)を意味し音圧の振幅の 2 乗に比例するが単位面積当たりの音の大きさ(音響パワー)を音の強さ(音響インテンシティ)という。

さて、人の耳は音の強さにして $10^{-12}w/m^2$ から $10w/m^2$ 、音圧にしても 2×10^{-5} Pa から 63Pa とものすごく広い範囲である。基準値を 1 として順々に数えると音の強さの範囲は 1 から 10 兆、音圧にしても 1 から 300 万の範囲に及ぶ。このように多様な音の大き

さを人の耳はどのように聞き分けているのか。100 番目と 101 番目の音の区別はまずつかないが、100 番目と 200 番目すなわち大きさが 2 倍になればこれは区別がつく。実は大きさが 1.5 倍になると何とか区別がつくようになる。ただし、音の大きさが 2 倍になっても、人の耳は 2 倍になったと感ずるのではなく、少しおおきくなったと感ずるだけである。人の耳は音の大きさの常用対数に比例した聞き取りをする。

そこで音の強さのレベルを次式で定義する

$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad \dots \dots (9)$$

ここで I は音の強さ、 I_0 は基準の強さ、前述の $10^{-12}w/m^2$ である。これは音圧レベルとも呼ばれる。単位は dB (デシベル) である。これによると人が耐え得る最大の音圧レベルは 130dB になる。

周波数により耳が感ずる強さの違いを考慮する場合、等感曲線というものをきめ、周波数により異なる適当な係数をかけて累積して求めた音圧レベルを A 特性音圧レベルとよびその大きさに (A) をつけ dB(A) と表し、騒音レベルを表すときに使用する。

4. 良い音を楽しみ悪い音を消すには

良い音を創るのはむづかしい。人が愉げる良い音と言えば、美しい歌声、上手な楽器演奏と大体音楽の領域に限られる。後は、的確な情報を伝える音、又は声、や好ましい人やものの声や音などが良い音と考えられる。それに対して、自然の中には良い音と感ずられる音が豊富にある。これらの良い音はいずれも自分で創る出すことはできない。ただ、一つできることは、その音を録音して聞くということだけであろう。

一方、悪い音を創り出すのは簡単である。逆に悪い音を消すには工夫がいる。悪い音を消すもっとも単純な考えは、音の発生源を消し去ることであるが、これは現実には不可能なことが多い。この場合、音の聞こえない所へ退避する方法がある。壁も何もない所では、音は球面状に広がり、音源からの距離の二乗に面積が比例するから、距離が 2 倍になると音の大きさは 1/4 になり、音圧レベルは 6dB 減少する。自然に恵まれた太古の昔であれば、うるさい音があってもそこから遠ざかることが簡単にできたろうから、まず騒音問題は起こらなかったであろう。

悪い音を消す、すなわち騒音対策としては音源の遮蔽か音源を遠ざけるまたは遠ざかる方法のほか

(1) 音源の強さを小さくする(2)音の伝播経路を遮断する(3)音の減衰を高めるという方法が考えられる。

(1) の方法は、音の発生メカニズムを研究して、不必要な音を発生しないように努める。例えば、航空機騒音の主因であるジェットノイズの音響パワーはジェット速度の 8 乗に比例して増加する。一方、推力によるパワーは速度の 3 乗に比例するから、推力を一定に保ったまま噴流速度を減少できればジェットノイ

ズを減らすことができる。この原理に基づき開発されたのが、ターボプロップやターボファンエンジンというジェットエンジンであり、これらは、遅い流れをより多く発生することにより、パワーを一定に保ちながら騒音を低減するものである。また、一般の機械加工でも仕上げ面の精度を向上することにより、表面粗さによる騒音を減少したり、固体同士の急激な接触をなくす設計をすることにより、機械音を低減することができる。

(2) の方法は、音源を防音箱やコンクリート壁などで完全に囲むか、対象者または物の周りを防音箱やコンクリートの壁などで囲う方法である。建物等にはガラスの二重窓などは有効な方法である。建物壁に吸音材や遮音剤を詰めることにより、騒音放射や侵入を防ぐことができる。また、室内の音圧レベル (SPL) と音源のパワーレベル (PWL) との間には

$$SPL = PWL + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \dots (10)$$

の関係がある。ここで Q は指向係数であり自由空間なら 1、壁上では 2、壁と床のへりでは 4、部屋の隅では 8 となる。また、 R は室定数で壁の平均吸音率を $\bar{\alpha}$ とすると

$$R = \bar{\alpha} S / (1 - \bar{\alpha}) \dots (11)$$

と定義される。無響室のような反響のない所では $\bar{\alpha}$ は 1 に近くなり、(10)式右辺第 2 項は無視することができる。室内で音源から離れた位置では同項の影響が大きく、吸音性のあまりない壁に吸音剤を張ることによる低減効果は大きい。($\bar{\alpha}$ が小さい場合、吸音力を 10 倍にすると 10dB の消音効果がある。)

音源と対象物 (受音点) 壁等で遮音する場合の入射音 I_i に対する透過音 I_t の比を透過率という。これを τ で表すと

$$\tau = I_t / I_i \dots (12)$$

となる。これから透過損失 TL が次式で定義される。

$$TL = 10 \log_{10} (1 / \tau) \text{ [dB]} \dots (13)$$

騒音源が屋内にある場合、内側の平均音圧レベルを SPL_i 、外側の音圧レベルを SPL_e とすると

$$TL = SPL_i - SPL_e - 6 \text{ [dB]} \dots (14)$$

騒音源が室外にある場合、外側の音圧レベルを SPL_o 、内側の音圧レベルを SPL_i とすると

$$TL = SPL_o - SPL_i + 10 \log_{10} (S/A) \text{ [dB]} \dots (15)$$

ここで S は騒音が進入する外壁 (または窓) の面積 (m^2)、 A は部屋の吸音力 (m^2) である。部屋の吸音力 A (m^2) は平均吸音率 $\bar{\alpha}$ と面積 S (m^2) の積で

与えられる。

防音壁がある場合の音の回折による減衰量は次式で定義されるフレネル数 (N) が大きいほど減衰が大きい。

$$N = 2\delta / \lambda \dots (16)$$

ただし δ は音源から受音点までの回折距離と直接結んだ距離との差である。防音壁にも表面を吸音処理していないと、内側の騒音を増大したり、音源が位置が浮き上がった効果を受け事実上防音壁の役目をしなくなることもあるので要注意である。

壁等に吸引力のない隙間がある場合も注意を要する。まず、波長よりも大きい隙間があれば、音は減衰することなく通過する ($\tau = 1$)。波長よりも小さくしかも薄い隙間がある場合は、開口端補正を含めた空気塊が振動するために、孔の面積と板の厚さから予想される以上の音のエネルギーが背面に通過する ($\tau > 1$)。また、波長より十分小さい孔で厚さが厚い隙間の場合には、孔の内部で定在波(共鳴)が生じ、その共鳴周波数では入射側で隙間開口より実質的に広い入射面のエネルギーがそのまま、透過側の放射面から放射される ($\tau > 1$)。

最後に (3) の音の減衰を高める方法を考えよう。既に距離による減衰や、吸音剤による音の減衰に触れたが、さらに積極的に音を低減させる方法として消音器がある。消音器ももっとも簡単な方法は吸音材を内張りしたダクトである。直接音の透過の吸音型ダクトは大きな消音効果を持つ。この消音器の透過損失は次式によって求められる。

$$TL = (\alpha - 0.1) \frac{S}{A} \ell \dots (17)$$

ここに α は吸音材料の吸音率、 S はダクトの周長 (m)、 A はダクトの断面積 (m^2)、 ℓ はダクトの長さ (m) である。

吸音効果を高めるには吸音材を厚くすること、背後に空気層を置くこと、表面を孔あき構造にすることが有効である。孔あき板構造体では共鳴による消音効果もある。この場合の共鳴周波数 f_0 は次式で与えられる。

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{(t + 0.8d)L}} \text{ [Hz]} \dots (18)$$

ここで、 c は音速、 p は開口率、 t は表面板の厚さ、 d は表面孔の直径、 L は背後空気層の厚さである。

また、ヘルムホルツ (Helmholtz) の共鳴機と呼ばれるものは、空洞部と小さな開口をもつ小管からなり、その共鳴周波数は次の通りである。

$$f_0 = \frac{\omega_n}{2\pi} \text{ [Hz]} \dots (19)$$

ただし、 $\omega_n = \sqrt{\frac{Ac^2}{Vl}}$ 、 A は小管の断面積、 V は空洞

の体積、 l は小管の長さである。小管の長さには開口端補正が必要である。補正量は小管の半径の0.6倍程度である。このほか、膨張型消音器や干渉型消音器がある。

膨張型消音器はダクトと空洞を組み合わせ、入射した音の一部を空洞部に閉じ込め消音する方法で、有効な周波数範囲は限られるが、共鳴型より広い周波数範囲で有効である。直径 D_1 のダクトに直径 D_2 の空洞を取りつけた場合、空洞部の長さを l とすると消音効果は $f=c/4l$ 、 $3f$ 、 $5f$ …で高く、 $2f$ 、 $4f$ …で低い。膨張比 $m=S_2/S_1=(D_2/D_1)^2$ (ここで S_1 、 S_2 はそれぞれダクトおよび空洞の面積) と置くと透過損失は次式で与えられる。

$$TL=10\log_{10}\left\{1+\frac{1}{4}\left(m-\frac{1}{m}\right)^2 \sin^2 kl\right\} \dots (20)$$

空洞部に多孔質吸音材料を内張りしたり、空洞部に短管を挿入することによって透過損失が改善される。

ダクトの周囲に空洞を設けて小さな孔をあけた構造の消音器が低・中音部の特定周波数成分の騒音低減に有効である。この場合の透過損失は

$$TL=10\log_{10}\left\{1+\left(\frac{\sqrt{c_0V}/2A}{f/f_0-f_0/f}\right)^2\right\} \text{ (dB)} \dots (21)$$

$$\text{ここに、} f_0=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{c_0}{V}}, \quad \omega=\frac{nA_0}{t+0.8d} \text{ (m)}$$

であり、 t は孔の長さ、 n は孔の数、 A_0 は孔断面積である。他のパラメータは(18)や(20)式と同じである。

低音部の特定周波数成分のレベルが特に大きい騒音の低減に、干渉型消音器が用いられることがある。これは入射音の通路を二つに分けて、一方が他方より長くして、再び通路を1つにしたものである。一方を l_1 、他方を l_2 とした場合 ($l_1 > l_2$)、透過損失は $l_1 - l_2 = \lambda/2$ 、 $l_1 + l_2 = \lambda$ を満足する周波数 f および $3f$ 、 $5f$ … (Hz)でもっとも大きくなる。なお、通路の断面寸法は、音の波長に比較して小さくする必要がある。能動制御では、逆位相の音と干渉させることにより、音を低減する方法を取る。

吹き出し口から高速で流体が吹き出すときに発生する、ジェットノイズの消音には吹き出し口消音器が用いられる。調節弁や自動車エンジンのマフラー、自動機械運転のための圧縮空気の排気口のように、流速低下があまり重要でない場合は、吹き出し口に多孔板や金網などを付けて (これをブラストサプレッサとい

う) 小さな孔から流体を吹き出させ、騒音源ができるだけ吹き出し口付近にとどまるようにする。これにより吹き出し流によって生じる騒音の低周波成分が減少し、高周波の成分が増加するが、これはその後の吸音形ダクトで吸音される。消音器出口口径は流速を下げため入り口口径より大きくする。

流速を下げることにより推力が低下すると困るジェットエンジン用の消音器としては、噴流中の衝撃波の発生を抑えるため、ノズル壁を多孔にする、出口にタブやスロットを設ける、主流と周辺噴流を組み合わせる、吹き出し口をシュートやチューブで細分する、イジェクターにより外部の空気を引き込み、流量を増やすことにより流速を低く抑え併せて混合促進を行う等の方法が講じられている。

5. 振動の功罪

音が空気を介して耳から伝わるのに対し振動は、地面や床、あるいは乗り物などの座席を通して皮膚から伝わる。振動もゆるやかで、穏やかな振動であれば、感覚に変化を与え、愉快に感じたり、気持ちを落ち着かせてたりする効果があるが、不意の振動や激しい振動は、人を不愉快にするばかりでなく、機械や建物を破壊することもあるので一般には振動は嫌われている。

振動の大きさは、振幅、速度、加速度、加加速度(ジャーク)で表される。物理量として振動を計る場合は振幅と振動数が分かればよいが、人体や建築物に及ぼす影響を見る場合は、加速度や加加速度又は速度が使用される。加速度を表す場合は重力加速度 (g) を基準とすることもあるが、JIS規格の基準値は 10^{-5}m/s^2 であり、振動レベルとして次式が定義される。

$$20\log_{10}a/a_0 \dots (22)$$

ここで a は対象加速度、 a_0 は基準値である。

動物実験では、5~20Hzの振動を5~15g与えると肺出血を起こすことが報告されている。人体の振動に対する感覚は複雑であるが、振動の加速度振幅と振動数との間にある関係があり、人体の振動感覚は①低い振動数範囲では水平振動に敏感であるが、ある振動数以上では水平振動よりも鉛直振動に敏感である。②低い振動数の振動に対してはジャーク、中程度の振動数に対しては振動加速度、高い振動数に対しては振動速度を感じる③直立の場合4~5Hzに人間の共振点がある。④人間の振動感覚は振動の変位振幅を s 、振動数を f とするとき、 $sf^n = \text{一定}$ ($n=0\sim3$) の関係に支配される。人体が直接影響を受けるのは力であるから、振動を加速度で計るのは適当に思われるが、人体に吸収されるエネルギーの観点に立つと評価法が異なってくる。(22)式で定義された振動レベルはデシベル(dB)で表し、 a は振動感覚補正を行った振動加速度実効値であり、鉛直および水平振動について一定の値が決められている(表1。 a は次式によって算出する。

$$a = \left[\sum a_n^2 10^{C_n/10} \right]^{1/2} \dots (23)$$

ただし、 $\omega_n = \sqrt{\frac{Ac^2}{Vl}}$ 、 A は小管の断面積、 V は空洞

の体積、 l は小管の長さである。小管の長さには開口端補正が必要である。補正量は小管の半径の0.6倍程度である。このほか、膨張型消音器や干渉型消音器がある。

膨張型消音器はダクトと空洞を組み合わせ、入射した音の一部を空洞部に閉じ込め消音する方法で、有効な周波数範囲は限られるが、共鳴型より広い周波数範囲で有効である。直径 D_1 のダクトに直径 D_2 の空洞を取りつけた場合、空洞部の長さを l とすると消音効果は $f = c/4l$ 、 $3f$ 、 $5f \dots$ で高く、 $2f$ 、 $4f \dots$ で低い。膨張比 $m = S_2/S_1 = (D_2/D_1)^2$ (ここで S_1 、 S_2 はそれぞれダクトおよび空洞の面積) と置くと透過損失は次式で与えられる。

$$TL = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl \right\} \dots \dots (20)$$

空洞部に多孔質吸音材料を内張りしたり、空洞部に短管を挿入することによって透過損失が改善される。

ダクトの周囲に空洞を設けて小さな孔をあけた構造の消音器が低・中音部の特定周波数成分の騒音低減に有効である。この場合の透過損失は

$$TL = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \left(\frac{\sqrt{c_0 V} / 2A}{f / f_0 - f_0 / f} \right)^2 \right\} \text{ (dB)} \dots \dots (21)$$

ここに、 $f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{c_0}{V}}$ 、 $c_0 = \frac{nA_0}{t + 0.8d}$ (m)

であり、 t は孔の長さ、 n は孔の数、 A_0 は孔断面積である。他のパラメータは(18)や(20)式と同じである。

低音部の特定周波数成分のレベルが特に大きい騒音の低減に、干渉型消音器が用いられることがある。これは入射音の通路を二つに分けて、一方が他方より長くして、再び通路を1つにしたものである。一方を l_1 、他方を l_2 とした場合 ($l_1 > l_2$)、透過損失は

$$l_1 - l_2 = \lambda/2, l_1 + l_2 = \lambda$$

および $3f$ 、 $5f \dots$ (Hz)でもっとも大きくなる。なお、通路の断面寸法は、音の波長に比較して小さくする必要があり、能動制御では、逆位相の音と干渉させることにより、音を低減する方法を取る。

吹き出し口から高速で流体が吹き出すときに発生する、ジェットノイズの消音には吹き出し口消音器が用いられる。調節弁や自動車エンジンのマフラー、自動機械運転のための圧縮空気の排気口のように、流速低下があまり重要でない場合は、吹き出し口に多孔板や金網などを付けて (これをブラストサプレッサとい

う) 小さな孔から流体を吹き出させ、騒音源ができるだけ吹き出し口付近にとどまるようにする。これにより吹き出し流によって生じる騒音の低周波成分が減少し、高周波の成分が増加するが、これはその後の吸音形ダクトで吸音される。消音器出口口径は流速を下げたため入り口口径より大きくする。

流速を下げることにより推力が低下すると困るジェットエンジン用の消音器としては、噴流中の衝撃波の発生を抑えるため、ノズル壁を多孔にする、出口にタブやスロットを設ける、主流と周辺噴流を組み合わせる、吹き出し口をシュートやチューブで細分する、イジェクターにより外部の空気を引き込み、流量を増やすことにより流速を低く抑え併せて混合促進を行う等の方法が講じられている。

5. 振動の功罪

音が空気を介して耳から伝わるのに対し振動は、地面や床、あるいは乗り物などの座席を通して皮膚から伝わる。振動もゆるやかで、穏やかな振動であれば、感覚に変化を与え、愉快に感じたり、気持ちを落ち着かせたりする効果があるが、不意の振動や激しい振動は、人を不愉快にするばかりでなく、機械や建物を破壊することもあるので一般には振動は嫌われている。

振動の大きさは、振幅、速度、加速度、加加速度(ジャーク)で表される。物理量として振動を計る場合は振幅と振動数が分かればよいが、人体や建築物に及ぼす影響を見る場合は、加速度や加加速度又は速度が使用される。加速度を表す場合は重力加速度(g)を基準とすることもあるが、JIS規格の基準値は 10^{-5}m/s^2 であり、振動レベルとして次式が定義される。

$$20 \log_{10} a/a_0 \dots \dots (22)$$

ここで a は対象加速度、 a_0 は基準値である。

動物実験では、5~20Hzの振動を5~15g与えると肺出血を起こすことが報告されている。人体の振動に対する感覚は複雑であるが、振動の加加速度振幅と振動数との間にある関係があり、人体の振動感覚は①低い振動数範囲では水平振動に敏感であるが、ある振動数以上では水平振動よりも鉛直振動に敏感である。②低い振動数の振動に対してはジャーク、中程度の振動数に対しては振動加速度、高い振動数に対しては振動速度を感じる③直立の場合4~5Hzに人間の共振点がある。④人間の振動感覚は振動の変位振幅を s 、振動数を f とすると、 $sf^n = \text{一定}$ ($n=0 \sim 3$)の関係に支配される。人体が直接影響を受けるのは力であるから、振動を加速度で計るのは適当に思われるが、人体に吸収されるエネルギーの観点に立つと評価法が異なってくる。(22)式で定義された振動レベルはデシベル(dB)で表し、 a は振動感覚補正を行った振動加速度実効値であり、鉛直および水平振動について一定の値が決められている(表1。 a は次式によって算出する。

$$a = \left[\sum a_n^2 10^{C_n/10} \right]^{1/2} \dots \dots (23)$$