

【整番】EE-01-TM-011	【標題】プラント設備などの空気伝搬音の簡易的な計算
分類：環境(騒音)/種別：技術メモ	作成年月：H24.10/改訂：Ver0.0(24.10) 作成者：N.Miyamoto

全 33 枚

1. はじめに

プラント設備に限らず過度な騒音は作業員や周辺住人に健康障害をもたらすばかりでなく、エネルギーロスや設備的な障害をもたらす。特にエネルギー消費の大きい動力/石化等のプラント設備関連や住居地区に隣接した製造設備では、この問題は切実である。ために騒音低減対策は、価値を生み出す生産行為からすれば殆ど無用の長物であるにも係わらず、さけて通れない設計の役務になっている場合が多い。下記に、プラント設備における騒音低減対策の内容を示す⁽⁷⁾。

【プラント設備の騒音対策】

区分	具体策	技術内容
音源対策	音源の低騒音化	音源：回転機器/レシプロ/内燃機関/調節弁/流体音/燃焼音など 対策：低騒音仕様採用、型式サイズ変更、防音カバーなど(*)
伝搬対策	空気伝搬音対策	距離減衰/自然減衰/回折・指向性/吸音/遮音/防音ラギング施工
	流体伝搬音対策	距離減衰/脈動抑制器の設置/共鳴管長の回避
	固体伝搬音対策	振動音/伝播音の絶縁(伸縮継手類/防振サポートなど取付け)
	消音器等の設置	タイプ(吸音形/膨張形/干渉形/共鳴形)の選択、配置

(*) 加振力(打撃/衝突/摩擦振動/不平衡力)の低減、振動絶縁、制振処理、せん断層/渦/乱れ等の排除、

この表からわかるように、騒音対策は **音源対策 & 伝搬対策** につきる。これらはいずれも膨大で多様な技術内容を持っている。騒音の予測技術はこの表に特記されていないが、勿論、これら対策は場あたりのものではなく、大なり小なり、設計計算や解析更には計測/分析などの予測・評価技術を伴ったものであることは言うまでもない。

さて音源から発生する騒音は空気/流体/固体を介して周辺に拡散してゆくが、いずれも大気放出の形で周辺環境と接触を起こす。故に、空気伝搬対策はもっとも端的な伝搬対策と云える。本 TS は、空気伝搬音対策のうち、その予測・評価技術に係わるもので、簡易的に空気伝搬音のレベルを推定するものである。シミュレーションソフトや FEM と連動したモード解析などが一般化している当今、本 TS の情報には 19 世紀的なイメージが残る。また伝搬音計算そのものについても、

「通常音源の機側 1m で音圧レベルが制限されるので、伝搬音推算の意義は薄いのでは？」

「騒音対策には後追いの面があるので、運転結果を計測/分析してから対処できるのでは？」という確かにこれらは然りであって、伝搬音の推算は設計的に必須というわけではない。しかし、設計から運転に至る様々なエンジニアリング上の局面を考えれば、顧客やコンサルとの付き合いも含めて、伝搬音に関する構造的な理解は決して無意味ではないと思われる。

[環境問題への関心もあって騒音に関する文献/テキストは豊富である。例えば「騒音振動対策ハンドブック(技報堂)」、「機械振動ハンドブック(JSME)」等の情報は膨大で広範にわたる。しかしプラント設備の騒音対策に必要な情報はその一部であるから、本 TS ではこれらの文献から抽出する形で集約し可及の範囲でその背景を明らかにした。以後これを止まり木にして、更に情報を補い集約し精錬化してゆきたい。]

本 TS で使用される記号の定義は以下の通り(本文中で特記される時は特記の方を優先)。

ρ = 媒体(空気)密度(kg/m³)、 c = 媒体(空気)の音速(m/s)、 p = 音圧(ここでは有効音圧)(Pa)、
 u = 粒子速度(m/s)、 i = 虚数、 t = 時間、 x, y = 座標、
 f = 周波数(振動数)(Hz or cycle/s)、 ω = 角周波数(rad/s)、 T = 周期(sec.)、 λ = 波長(m/cycle)、
 I = 音の強さ(W/m²)、 I_0 = 音の強さ規準値(W/m²)、 I_i, I_r, I_t, I_a = 音の強さの入射分, 反射分, 透過分, 吸音分
 P = 音響出力(W)、 P_0 = 音響出力規準値(W)、 E = エネルギー密度(W/m³)、 TL = 音の透過損失(dB)
 L_I = 音の強さレベル(dB)、 L_p = 音圧レベル(dB)、 L_w = 音響出力(音響パワー)レベル(dB)、
 S = 面積(m²)、 r = 音源からの距離(m)、 le = 長さ(m)、 θ = 入射角 or 傾角、
 Q = 指向係数(-)、 τ = 透過率(-)、 α = 吸音率(-)、 R_e = 反射率(-)、 A = 吸音力(m²)、 R = 室定数(m²)

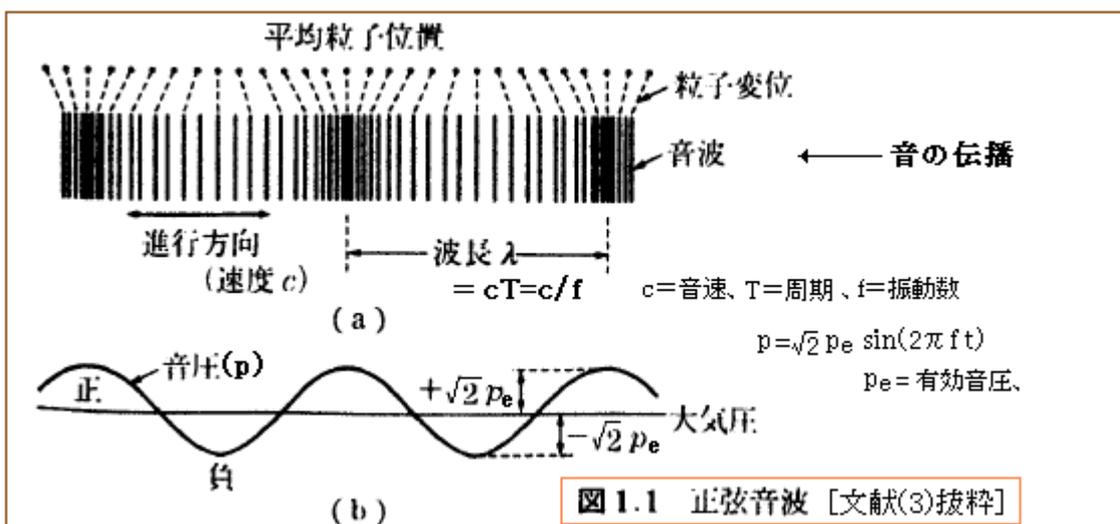
なお音の伝搬では、音の強さ(W/m²)をそのまま用いることはない。数字が大きすぎるのでその強弱を
 レベル $L_I = 10 \log_{10}(\text{音の強さ} \div \text{強さの規準値}) \rightarrow$ デシベル(dB)

で現わしている。これは他の強弱の表現 [L_p や L_w] でも同じである。本 TS の場合、 $10 \log_{10}(\quad)$ の表示を
 $10 \log(\quad)$ と略記しているので注意してほしい。

2. 空気伝搬について

2.1 空気伝搬の基礎

(1) 空気中を音(音波)が伝播する過程を下図(a)に示す。音波は音源の界面で初生し、粗密波となって空中
 を伝播する。すなわち空気を圧縮-膨張させることで、大気圧の変化を引き起こし、図(b)のような空気
 圧(いわゆる音圧)の変動となって空中を伝播する⁽³⁾。



なお、伝搬音計算で用いられる音圧としては通常、音圧波動の最大値 $p_m (= \sqrt{2} p_e)$ の $1/\sqrt{2}$ 倍、
 即ち $[p_e]$ が引き当てられる。この有効音圧 p_e は音圧の実効値であり音響計算上の“音圧 p ”である。

(2) 音は音響エネルギーによって伝搬する。音響エネルギーは音響出力(単に出力またはパワー)とも呼ばれ
 仕事率ワット(W)の単位をもっている。音の強さ I は単位面積当たりの音響エネルギー(W/m²)として

カウントされる。また音の強さ I と音圧 p の間には一定の関係 ($I=p^2/\rho c$) があるので、音の強弱は次の2つの式で表現できる。

$$\text{音の強さレベル(IL)} : L_I = 10\log(I/I_0) = 10\log(I/10^{-12}) \quad \text{-----(2-1)}$$

$$\text{音圧レベル(SPL)} : L_p = 20\log(p/p_0) = 20\log\{p/(2 \times 10^{-5})\} \quad \text{-----(2-2)}$$

I と p はどちらも実効値であり L_p は平面波(*1)を仮定している。 I_0 と p_0 は規準値であり、 $L_I=L_p$ になるように調整されている。 I_0 、 L_0 は規準値である。

また音響出力 P は音源のエネルギーであるが、その強弱は次式で定義される。

$$\text{音響パワーレベル(PWL)} : L_w = 10\log(P/P_0) = 10\log(P/10^{-12}) \quad \text{-----(2-3)}$$

この場合、 $P=I \times S$ (強さ \times 面積) の関係があるので、規準値 P_0 は I_0 と同じ 10^{-12} になっている。

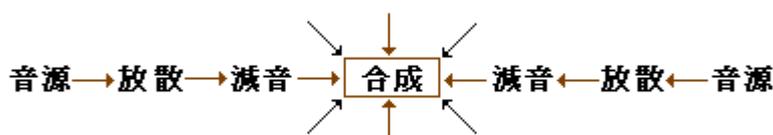
- (3) 音源からの音波が、障害物のない自由空間を無限遠方に向かって放射(放散)されるとき、音源の PWL と受音点の SPL の間には基本的に次のような関係がある[補足 1 参照のこと]。

$$L_p = L_w - 10\log S \quad \text{-----(2-4)}$$

ここで S は、面内のどの位置でも等しい音圧レベルを持った放射(拡散)面積である。面積 S は音源からの離隔距離(r)が増すにつれて増加し、音圧レベル L_p は減退する。即ち放散による減音(*2)いわゆる距離減衰が起きる。放射面積 S は音源のタイプによって異なる。これについては 3.1 項で詳細を示す。

2.2 空気伝搬の特性

- (1) 単一の音源から放射された音は空気中を放散し減音しながら伝搬される。そして音源から離れた位置の受音点では、他の音源からの伝播された音と重なって合成音になる。



このプロセスでは音源の音響出力レベルと放散過程における減音から伝搬量が決まる。

- (2) まず空気伝搬のソースとしての音響出力レベル(PWL)について。通常、設備を構成する機器や部品に生じる音響エネルギーが顕在化する場合に、これを音源と称している。プラント設備の場合、機械音はむしろ少なく流体音や流体-固体干渉音が多いのが特徴的である。それらの特性も段々わかってきており PWL データ/推算式もかなり蓄積されている。なお適切な PWL データがないときは、計測によっても音響出力レベルを求めることができる。各種音源の PWL のデータ/計算式は別途 TS で整理する予定。本 TS では PWL は既知として扱う。

なお伝搬計算では、音源は厚みを持たない点(→点音源)、ないし点の連続(→線音源および面音源)を指している。実際の音源はボリュームをもっているのですが、伝搬計算でいう音源は仮想的なものと云える。この仮想音源を意識しないと計算過程で混乱をきたすことがある(要注意と思う)。

実際のプラント設備では「音響出力に透過損失を見込み、機側 1 m で定義された音圧レベル(SPL1)」

が PWL の代わりに使用されることが多い。この場合、上記の**仮想の点音源**で扱えば、騒音機器表面から 1 m 位置までの減音量は、 $\Delta L_p = 10 \log(2\pi r^2/S_0) = 20 \log r + 8 - 10 \log S_0$ 。(但し $S_0 =$ 機器表面積) であって、 $r=1\text{m}$ では、 $\Delta L_p = 8 - 10 \log S_0$ になる。しかし一般には機器表面積 S_0 をカウントするのは大変なので、 S_0 の存在を無視して $\Delta L_p = 8 \text{ dB} \rightarrow L_w = L_{p1} - 8$ とすることで、安全側に PWL (L_w 値) をセットできる。ただこのような措置が必要になる局面は殆ど考えられず、単に SPL1 を伝搬の始点にしてカウントして行けばよい。ただその場合、**受音点までの距離 r は機器表面からとるよりも機器の中心からとった方がいい** (その方が理にかなっているし機器外形を考える必要がない)。

なお機側 1m 以内では $\Delta L_{p1} < 8 \text{ dB}$ になるが、これはありえないので伝搬計算の適用外である。そういう意味で、“機側 1m” の背景は理解できる。

(3) 次に放散過程における減音について。屋外の場合、次の 3 つのタイプがある。

- ① 距離依存タイプ—放散による減音、回折による減音
- ② 透過損失タイプ—遮音や吸音による減音、
- ③ 超過減衰タイプ—大気条件による減音、地面/樹木等による減音

① は音源から遠ざかることで、拡散面積が広がってエネルギーが希薄化するもの。距離減衰とも言われる。② は空気中の音波が固体壁を通過するに際して減音。気体と固体の動特性の違いによるもので壁の厚み/構造にもよるが、通常、① とは並存しない。壁に吸音材が貼られているときは吸音効果によって減音が増加する。③ は、大気吸収/風/温度/湿度/地面の粗さ/樹木による減音、距離による減音過程を通して存在しこれに寄り添う形になる。これらの減音については、**次節 3** で詳述する。

また音の合成については、**3.5 項** で説明する。

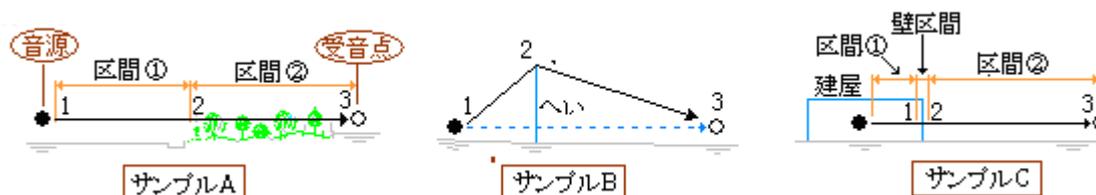
屋内の場合は、一般に③は殆ど無視できる。代わりに壁反射の影響が顕著になる。**次次節 4** で代表的な例をあげて説明する。

(*1) 音源の大きさが波長より大きく音波の伝播面が同位相でフラットな音波。他に球面波/円筒波があるが、伝搬計算では扱いやすい平面波で近似的に扱われる。

(*2) 放散という言葉は専門用語ではないが、放射よりも空間的なので使用した。

2.3 伝搬音の推算

(1) 空気伝搬によって音源から受音点に伝わる音(音波)がどう変化するかは、経路に存在する条件や環境あるいは受音点の位置による。サンプルを下図に示す。



サンプル A では、まず区間の始まりを音源の外周(基準としては機側 1 m)に設定する。この場合、(2-4)式[具体的には後述の 3.1(1)の式、 $r=1\text{m}$ とする]で、区間の始まりの音圧レベル L_{p1} を計算する。音源から受音点までを直線で結んだ区間は①②に別れている。超過減衰タイプの減音が異な

るからである。すなわち区間①では[大気条件]のみ、区間②ではこれに樹木/地面等の減衰が加わる。故に空気伝搬後の受音点の音圧レベル L_{p3} は、

$$L_{p3} = L_{p1} - \Delta L_{L1-3} - \Delta L_{A1-3} - \Delta L_{N2-3} \quad \text{-----(2-5)}$$

ここで、 ΔL_L = 距離による減音、 ΔL_A = 空気吸収など大気条件による減音、
 ΔL_N = 樹木/地面など自然条件による減音、サフィックス 1,2,3 → 位置(図による)、

サンプル B でも、まず A の場合と同じように L_{p1} を設定する。この場合は塀があるので、音波の回折による減音 ΔL_D が加わる。従って、受音点の音圧レベル L_{p3} は

$$L_{p3} = L_{p1} - \Delta L_{L1-2} - \Delta L_D - \Delta L_{A1-3} \quad \text{-----(2-6)}$$

ここで、 ΔL_{L1-2} = 直進の距離減衰、 ΔL_D = 回折による減音、 ΔL_A は上記と同じ

サンプル C では屋内区間①では拡散による減音が加わるので屋外区間とは分離して考える。壁通過に際しては透過損失による減音がある。その後、建屋中心や壁を点音源として、あるいは建屋壁を面音源として屋外に伝搬する。

$$L_{p3} = (L_{p1} - TL) - \Delta L_{L2-3} - \Delta L_{A2-3} \quad \text{-----(2-7)}$$

ここで、 L_{p1} = 後述の室内伝搬式即ち(4-1)~(4-3)式による位置 1 の音圧レベル

TL = 壁の透過損失、 $\Delta L_L, \Delta L_A$ = 上記と同じ

この式の放散による減音 ΔL_{L2-3} は、受音一点の位置によって異なるので注意を要す(3.2 項参照) なお始点の L_{p1} は $[L_w - 10 \log S_1]$ としてもよい (S_1 は始点位置での放射面積)。3.1 項と 4.1 項は、 L_w を始点にして記述している。

(2) 上記の 3 つのサンプルは比較的、シンプルな例である。実際はもっと複雑になることが多い。受音点是对象空間に無数にあるので、その中でクリティカルな SPL を割り出しのは手間がかかる。また受音点では複数以上の多数の音源からの音が重複しているのでこれらを合成する必要がある。これらの作業はたとえ目の子でやるにしろ大変なので、計算ロジックを整理してプログラム化するのがいい。EXCELなどで、比較的容易に作れると思われる。

(3) もともと音波は無数の周波数成分と位相差をもっているし無数の反射波をもっている。プラント設備では、これを忠実にフォローした音響解析はごく稀で、手間や費用もかかるのでエンジニアリング的ではない。一般の伝搬計算は、**騒音スペクトル計算**と**オーバーオール音圧レベル計算**の 2 通りである。

前者は、周波数帯域毎に PWL ないし SPL_1 をセットして伝搬計算を行い、受音点の各周波数帯域毎の SPL を求め、更にこれらを合成してオーバーオール値を出すもの。ピーク周波数がわかり騒音対策が合理化できる(やや解析的な設計に踏み込むことができる)。

後者は、PWL ないし SPL_1 のオーバーオール値を使って伝搬計算を行い受音点のオーバーオール値を求めるもの。周波数分析された PWL/ SPL_1 データは少なく、オーバーオール値で与えられることが多いため、この計算の方が一般的になっている(単に大小をみるには十分である)。

音の伝搬計算でもうひとつ厄介なのは、**騒音レベル(A 特性音圧レベル)**と**音圧レベル**の区分である。通常の設計計算は音響理論によるもので、そのレベル表示は **dB** であるが、騒音測定でいう騒音レベル

は理論上の dB を聴音補正したもので、**dBA** 表示である。通常の音の伝搬計算は、与えられた **PWL** が如何に減音してゆくかを見るものであるから、もし **PWL** が **dBA** で与えられれば、以降の伝搬計算は **dBA** の単位を持ち受音点の **SPL** は **dBA** になる。逆に **dB** の単位をもつなら以降は **dB** 単位になる。これらは表示の問題なので深刻ではないが、注意を要す。

なお、騒音制限値は **dBA** であるから、**PWL/SPL1** は **dBA** 表示が望ましい。そうでないなら、多少裕度を持たせて評価すればよい。一般に **dB** と **dBA** はそれほど乖離があるわけではない。

[以上はわかりにくいのかも知れない。補足 2 を参照されたし。]

3. 屋外における音の空気伝搬

3.1 放射による減音(距離減衰)

(1) 等高面である放射面積 S は、音源が点であるか、線であるか、面であるかによって異なる。個々の音源に対して、2.1 項の(2-4)式は次のようになる。式の導入については 補足 3 参照のこと。

$$\cdot \text{点音源} : L_p = L_w + 10 \log\{Q/(4\pi r^2)\} = L_w - 20 \log r - 11 + 10 \log Q \quad \text{-----}(3-1)$$

$$\cdot \text{線音源}(r < l/\pi) : L_p = L_w + 10 \log\{Q/(2\pi r \cdot l)\} = L_w - 10 \log r - 10 \log l - 8 + 10 \log Q \quad \text{----}(3-2)$$

$$(r \geq l/\pi) : L_p = L_w + 10 \log\{Q/(4\pi r^2)\} = L_w - 20 \log r - 11 + 10 \log Q \quad \text{-----}(3-3)$$

$$\cdot \text{面音源}(r < a/\pi) : L_p = L_w + 10 \log\{Q/(2ab)\} = L_w - 10 \log(2ab) + 10 \log Q \quad \text{-----}(3-4)$$

$$(a/\pi \leq r \leq b/\pi) : L_p = L_w + 10 \log\{Q/(2\pi rb)\} = L_w - 10 \log r - 10 \log b - 8 + 10 \log Q \quad \text{----}(3-5)$$

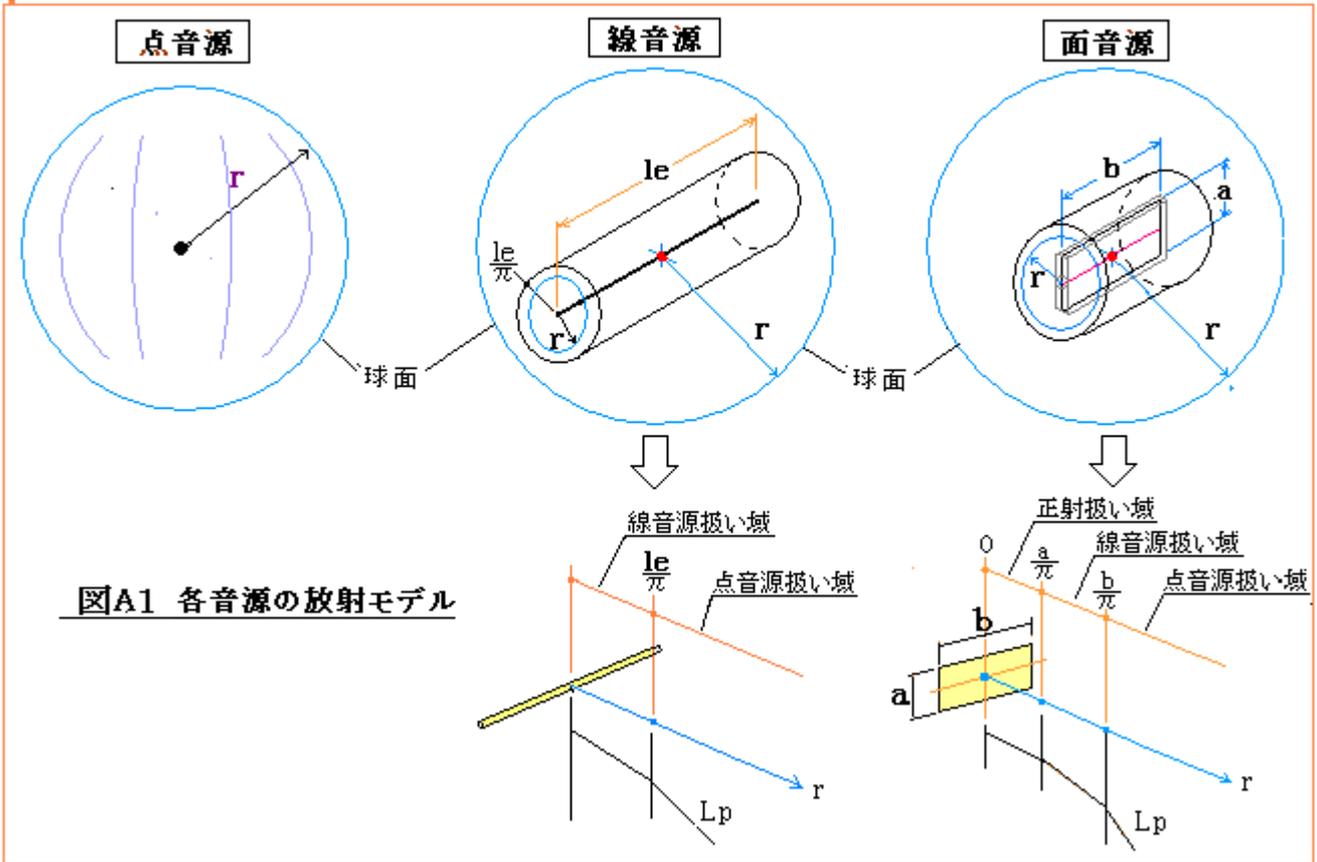
$$(r > b/\pi) : L_p = L_w + 10 \log\{Q/(4\pi r^2)\} = L_w - 20 \log r - 11 + 10 \log Q \quad \text{-----}(3-6)$$

ここで、 Q =指向係数、 r =音源からの距離、 a, b =面音源寸法(図 A1 参照)

各音源の、反射面のない自由空間における放射状態をモデル化して、**図 A-1** に示す。点音源の放射面は全ての距離 r で球面を維持している。一方、無限長さの線音源は全ての距離で円筒面であるが、有限長の線音源の放射面は円筒面であるが、距離 r が (l/π) を越えると、点音源扱いになる。また面音源の場合は、距離 r が (a/π) までは面的な扱いであるが、 $(a/\pi) \sim (b/\pi)$ では線音源扱い、 (b/π) を越えると、点音源扱いになる。線音源/面音源の場合は厄介である。

上記全ての式に含まれる指向係数 Q は、音源からの放射音が反射面にあって生じる反射音の影響 [補足 5 参照] を考慮したもの。反射面のない場合は $Q=1$ とし、反射面のある場合は **図 A-2** によるものとする。

なおここで使用されるパラメータ r は **2.2(2)項** でも述べたように、**仮想の音源(点/線/面)からの距離** である。仮想音源 以外に原点($r=0$)をとらない(安全側ならとっていいが程々にすべき)。



図A-2 指向係数Qの選択

点音源	線音源		面音源
<p>$Q=2$</p> <p>R.S</p>	<p>$r < (le/\pi)$</p> <p>$Q=2$</p> <p>R.S</p>	<p>$r > (le/\pi)$</p> <p>$Q=2$</p> <p>R.S</p>	<p>$r \leq (a/\pi)$</p> <p>$Q=2$</p> <p>R.S</p>
<p>$Q=4$</p> <p>R.S</p>	<p>$Q=4$</p> <p>R.S</p> <p>線音源扱い</p>	<p>$Q=4$</p> <p>R.S</p> <p>点音源扱い</p>	<p>$(a/\pi) < r \leq (b/\pi)$</p> <p>$Q=2$</p> <p>R.S</p> <p>線音源扱い</p>
<p>$Q=8$</p> <p>R.S</p>			<p>$r > (b/\pi)$</p> <p>$Q=2$</p> <p>R.S</p> <p>点音源扱い</p>

(2) 前記(3-1)～(3-6)式は、音源から r の距離にある受信位置の $[L_p - L_w]$ の関係を示している。しかし実際の計算では(特に L_{p1} が既知のとき)、同一の放射線上にある2つの受信点のレベル差 $(L_{p1} - L_{p2})$ の方が役に立つことが多い。(3-1)式から、このレベル差は次の式で与えられる。

$$L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(S_2/S_1) \quad \text{-----(3-7)}$$

具体的には各音源について以下のようなになる[式の導出については補足4を参照のこと]。

- ・点音源： $L_{p1} - L_{p2} = 20 \log(r_2/r_1)$ -----(3-8)
- ・線音源($r_1, r_2 < le/\pi$)： $L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(r_2/r_1)$ -----(3-9)
- ・線音源($r_1, r_2 \geq le/\pi$)： $L_{p1} - L_{p2} = 20 \log(r_2/r_1)$ -----(3-10)
- ・線音源($r_1 < le/\pi, r_2 \geq le/\pi, Q=1$)： $L_{p1} - L_{p2} = 10 \log\{le/(\pi r_1)\} + 20 \log\{\pi r_2/le\} - 2$ -----(3-11)
- ・線音源($r_1 < le/\pi, r_2 \geq le/\pi, Q=2$)： $L_{p1} - L_{p2} = 10 \log\{le/(\pi r_1)\} + 20 \log\{\pi r_2/le\} + 2$ -----(3-12)
- ・面音源($a/\pi \leq r_1, r_2 \leq b/\pi$)： $L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(r_2/r_1)$ -----(3-13)
- ・面音源($r_1, r_2 \geq b/\pi$)： $L_{p1} - L_{p2} = 20 \log(r_2/r_1)$ -----(3-14)
- ・面音源($r_1 < a/\pi, r_2 < b/\pi$)： $L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(\pi r_2/a) = 10 \log(r_2/a) + 5$ -----(3-15)
- ・面音源($r_1 < a/\pi, r_2 \geq b/\pi$)： $L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(b/a) + 20 \log(\pi r_2/b)$ -----(3-16)

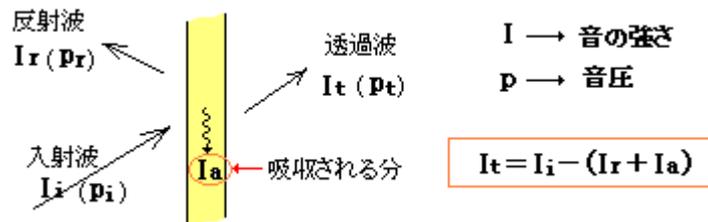
3.2 遮音構造などによる減音⁽¹⁾⁽²⁾

(1) 遮音構造は、文字通り音をさえぎって劇的に減音を図るもので騒音対策のメインである。その定義は「空气中を伝播する音波を遮る位置に設けて音波を受け止め、その裏面から放射される透過波のパワーをできるだけ小さく押さえるために設置される壁状の構造物」である⁽¹⁾。確かに気体と気体の間に圧倒的に質量の大きな、振動特性の異なる固体を割り込ませるのは非常に効果的である。具体的には次の3つのタイプがある。

- ①音源の音響的な隔離：機器類の防音カバー、機械室の外周構造、ダクト外板など
- ②受音点の音響的な隔離：工場内作業所/事務室/制御室/ラボなどの外周構造
- ③居室間などの相互隔離：隣接する作業所/事務室/制御室などの間の隔壁(間仕切り)

遮音構造の選択(設計)は次の流れに従って実施し、更にこれに気密/強度/断熱などの要求を加味する。

[音源 PWL vs 受音点 SPL 許容値] → [伝搬音推算] → [必要減音量] → [透過損失量] → [遮音構造選択]



(2) 遮音現象は上記のモデルで表わされる。遮音壁に入射した音波はその一部が反射/吸収され、その残りが壁を透過して伝搬する。透過率 τ は下記で定義される

$$\tau = I_t/I_i \quad (0 \leq \tau \leq 1) \quad \text{-----(3-25)}$$

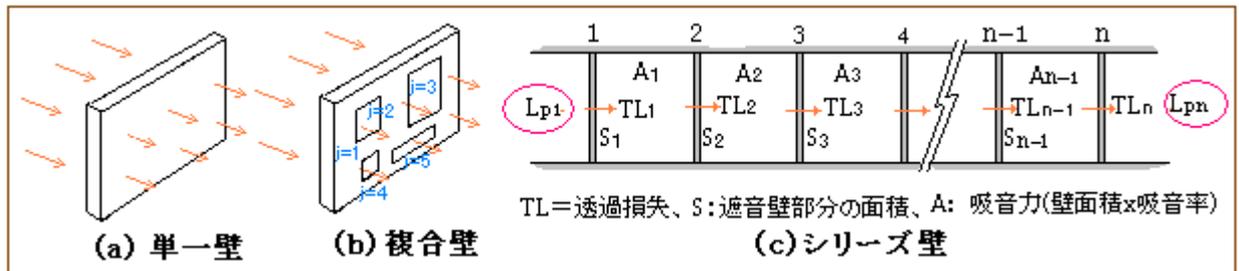
τ が小さい程、透過波の強さは低下する。この対数をとると

$$\log \tau = \log(I_t/I_i) = \log\{(I_t/I_o)(I_o/I_i)\} = \log(I_t/I_o) - \log(I_i/I_o)$$

$L_{It} = \log(I_t/I_o)$ 、 $L_{Ii} = \log(I_i/I_o)$ であるから、この式は $L_{Ii} - L_{It} = \log(1/\tau)$ となる。更に音の強さレベル L_{It} 、 L_{Ii} は、音圧レベル L_{pt} 、 L_{pi} に等しいので、 $L_{pi} - L_{pt} = \log(1/\tau)$ とも書ける。この左辺の $(L_{pi} - L_{pt})$ は、壁通過前後の音圧レベル差なのでこれを透過損失 TL とすれば次の定義式が得られる。

$$TL = 10 \log(1/\tau) \quad \text{-----(3-26)}$$

この辺の記述は変更の要あり、



(3) 上記は、入射波が単一で遮音壁が一様な場合[上図(a)]である。壁面が異なる透過率をもった幾つかの壁面で構成された状態で入射波が単一な場合[上図(b)]については、次のようになる。

$$TL_{av} = 10 \log \left\{ \frac{\sum S_j}{\sum (S_j \cdot 10^{-TL_j/10})} \right\}$$

$$\text{または } TL_{av} = 10 \log \left\{ \frac{\sum S_j}{\sum (\tau_j S_j)} \right\} \quad (\text{但し } \sum \rightarrow j=1,2,3\cdots) \quad \text{-----(3-27)}$$

ここで、S=遮音壁部分の面積(m²)、TL_j=j番目の壁面の透過損失(dB)

透過損失 TL_{av}は、総合透過損失(平均透過損失)あり、貼り合わせの遮音壁を単一壁として扱かえる。

また拡散空間をもってシリーズに繋がった遮音構造の場合[上図(c)]については、下記の通り。

$$TL_{(1-n)} = (TL_1 + TL_2 + TL_3 + \cdots + TL_n) + 10 \log \left\{ (A_1/S_1)(A_2/S_2)(A_3/S_3) \cdots (A_{n-1}/S_{n-1}) \right\} \quad \text{-----(3-28)}$$

ここで、A=室の吸音力(m²)=遮音壁部分を除く室の壁面積 x 吸音率、

TL₁, TL₂, TL₃...=各遮音壁の透過損失(dB)

透過損失 TL_(1-n)は、n個の遮音壁のオーバーオールな透過損失であってシリーズの遮音壁を単一壁として扱うことができる。

(4) 実質的な透過率τは物性表では与えられていない。実際は構造物/構造物ごとに、τを介せず、透過損失を計算したり計測している。例えば(a)図の均質な単一壁(単板)の透過損失は次式で得られる。

① 斜め入射波が透過する場合：

$$TL_o = 10 \log \left| 1 + \frac{z_a \cos \theta}{2 \rho c} \right|^2 \quad \text{-----(3-29a)}$$

ここで z_a=単板の音響インピーダンス密度、θ=入射角、

z_a=iωm, θ=0(垂直入射波)とおけば、

$$TL_o = 10 \log [1 + \{\omega m / (2 \rho c)\}^2] \quad \text{-----(3-29b)}$$

ここでω=音波の角振動数(rad/s)、m=平板の単位面積当たりの質量(kg/m²)

ωm ≫ 2ρc、ρc=414 kg/m²s、ω=2πfとすれば、

$$TL_o \doteq 20 \log(fM) - 42.5 \quad \text{-----(3-29c)}$$

ここで、M=面密度(kg/m²) -----mに同じ

(3-29c)の垂直入射波の式は実用式としてよく使われている。

② 拡散入射波が透過する場合：

$$TL = 20 \log \left\{ \frac{\omega m}{2 \rho c} \right\} - 10 \log_e [1 + \{\omega m / (2 \rho c)\}^2] \quad \text{-----(3-30a)}$$

log_e[]は自然対数である。ωm ≫ 2ρcとして変形すれば、

$$TL = TL_o - 10 \log [0.23 TL_o] \quad \text{-----(3-30b)}$$

ここで TL_o=(3-29)式による透過損失。TLは TL_oよりかなり小さくなるので注意(非安全側)。

斜め入射波は屋外などの無反射雰囲気と想定される。拡散入射波は屋内の吸音処理のない壁(無垢

材が露出した壁)で囲われた、**拡散音場に近い雰囲気**で想定される。

(3-29c)式からもわかるように、**壁の質量が大きい程(面密度 M が大きい程)、透過損失 TL が大きく**なる。遮音材料として鉛シートが使われるのはこの理由からである。また TL は周波数に依存することがわかる。バンド中心周波数毎に計算したものを合成する必要がある。

単板を 2 枚並べた中空構造については、垂直入射波について、

$$TL_o = 10 \log [1 + 4 \{ \omega m / (2 \rho c) \}^2 [\cos \phi - \{ \omega m / (2 \rho c) \} \sin \phi]^2] \quad \text{-----(3-31)}$$

ここで、 $\phi = \text{無次元量} [= 2\pi d / (cf)]$ 、 $d = \text{単板間の隙間(m)}$

小さい時は、近似的に、均質単板に置き換え(3-29c)式で計算すればよい。

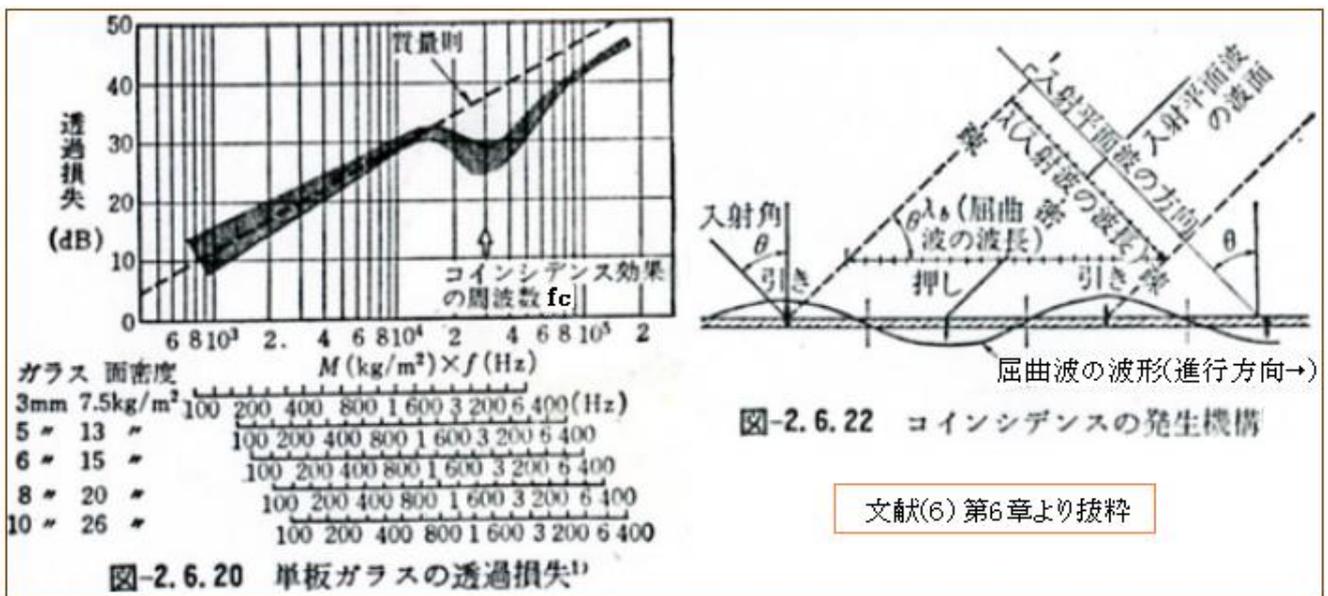
心材に吸音材などを挿入したサンドイッチ構造などについて 2 は材料メーカー等のデータに拠らざるを得ない(購入の場合、必要 TL は要求仕様になる)。ただ、

$$\text{無次元数 } E/(md) > 4.5 \times 10^8 \rightarrow \text{均質単板相当}$$

ここで $E = \text{心材のヤング率(kg f/m}^2)$ 、 $m = \text{表面材の面密度/厚さ(kg/m}^2/\text{m)}$ 、 $d = \text{心材厚さ(m)}$ で扱うことができる。

[建屋壁は多様である。その遮音性能については建築騒音のテキスト/資料を参照されたい。]

(5) 以上の透過損失は理想状態のもので、実際にはよく知られた**コインシデンス効果**によって、ある周波数以上では透過損失は低下する。図-2.6.20 はこの傾向を示すもので、その限界周波数で最も低下し Max.15dB ダウンする。この現象は、音波の振動数と壁の高次固有振動数が共振域に入って屈曲波ができこれによって能率的に音波が放射されるものである。



均質単板のコインシデンスの周波数は次式によって得られる。

$$f = \{ c^2 / (2 \pi \sin^2 \theta) \} (m/B)^{0.5}$$

$\theta = \pi/2$ で f は最小になるので、これをコインシデンスの限界周波数 f_c と呼ぶ。即ち

$$f_c = \{c^2 / (2\pi)\} (m/B)^{0.5} \text{-----}(3-32)$$

ここで、 m = 板材の面密度(kg/m^2)、 B = 板の曲げ剛さ($\text{N}\cdot\text{m}$) [= $Et / \{12(1 - \nu^2)\}$]、 c = 音速(m/s)

θ = 入射角、 E = 板材の縦弾性係数(N/m^2)、 t = 板厚(m)、 ν = ポアソン比(-)

もちろん単板のみならず、コインシデンス効果は存在する。設計に使用する TL にはコインシデンス効果を見込む必要がある。

3.3 回折による減音⁽³⁾

- (1) 放射方向に直交に近い形で塀(防音塀/障壁)を立てると、音はこれを回折して伝わるので、距離減衰が増加して直進の場合よりも減音量がアップする。この場合、塀の設置の後の減音量(ΔL_D)は図 7.7 から得られる(この図はたいていの音響テキストにでておりよく知られている)。

対象モデルは図の右肩の通り。 S は音源、 P は受音点を示す。塀があると $S \rightarrow O \rightarrow P$ と回折するので直線経路より、 $\delta = A + B - d$ だけ距離が伸びる。厚みのある塀や建物の場合は、下段のモデルのような $S \rightarrow O \rightarrow P$ の経路を想定してよい。

図の横軸の N はフレネル数と呼ばれるが、少し目盛の表示がわかりにくいかもしれない。例えば $N = 0.05$ では点音源の場合、7dB の減衰量になる。 $N = 1$ の時は 13dB になりその後、 N が 2 倍になる毎に 3dB ずつ増加する。 S と P を繋ぐ線が主要な目盛は朱マークで囲んでいる。

$S - P$ を結ぶ線が塀の上をパスして N が負になっても、 $N = -0.36$ までは 0~4dB の減音が残る(塀によって粗密波が擾乱されるため?)。

点音源(自由空間)の場合については、次の近似式で計算してもよい。

$$\begin{aligned} \text{減衰量 } \Delta L &= 10L \log N + 13 \quad (1 \leq N) \\ &= 5 + 8\sqrt{N} \quad (0 \leq N < 1) \\ &= 5 - 8|N|^{0.5} \quad (-0.36 \leq N < 0) \\ &= 0 \quad (N < -0.36) \end{aligned} \text{-----}(3-33)$$

図 7.7 の運用上の注意事項は次の通り。

- (i) フレネル数 N は周波数 f によるので減衰量は各周波数帯域毎の計算し必要に応じこれらを合成することになる。オーバーオール SPL 計算の場合は、PWL の騒音スペクトルの中で最大の dBA(または dB)を示す中心周波数について減衰量を求め、これを伝搬計算に用いざるを得ない。
- (ii) 図 7.7 は、半無限の長い障壁を前提としているので、塀長さが有限の場合はその影響を考える必要があるが、塀長さ > 5 倍 x 塀高さであれば、図 7.7 を使ってよい。
- (iii) 図 7.7 は自由空間(空中音源)を前提としている。半自由空間(地上近くに音源があるとき)では反射の影響で 0~3dB 程、塀の減音効果がダウンするので、図 7.7 から得られた結果から 3dB を引き去る。
- (iv) 塀を透過する音が大きいと、図 7.7 の回折効果が損なわれる。塀の透過損失が図 7.7 の結果より 10dB 以上高くなっていることを確認する。端的には塀の内側に吸音材を貼るのが良い。

[以上の記述は、大部分、文献(3)の記述内容に準じている。]

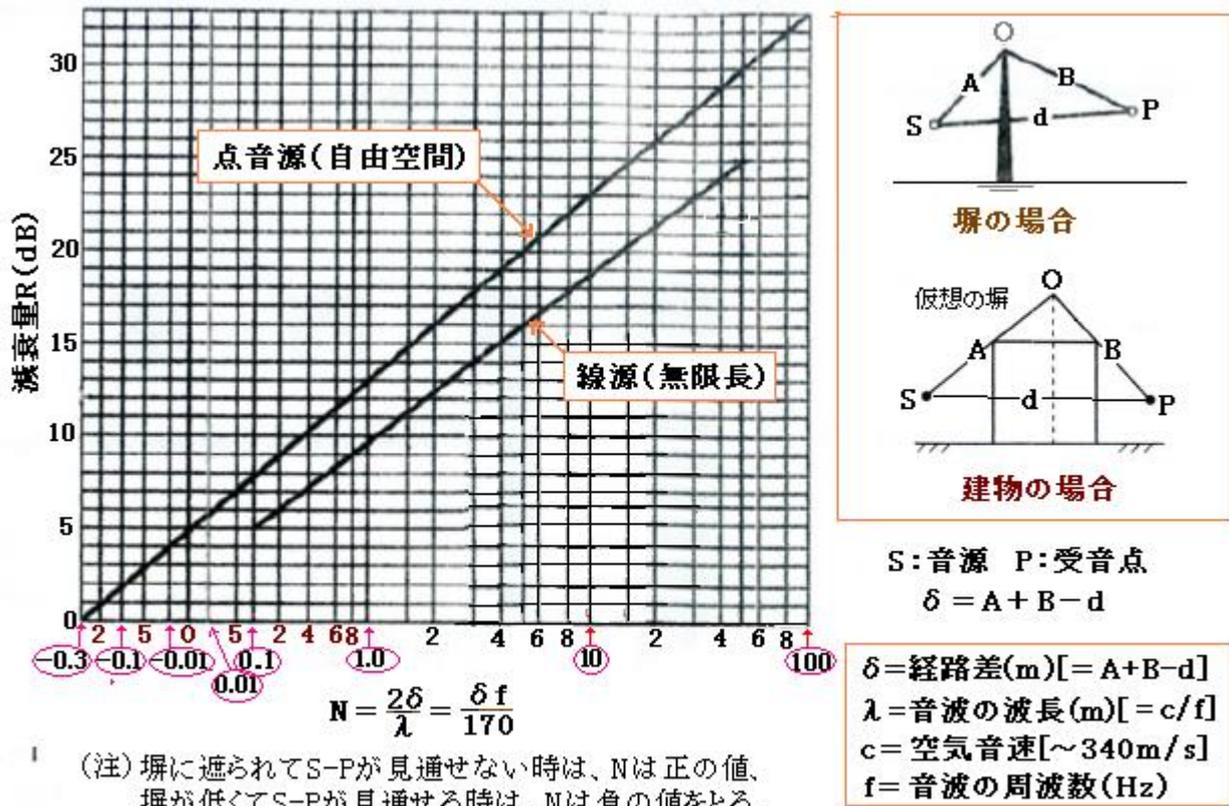


図7.7 自由空間の半無限障壁による減衰量(前川ら) [文献(3)より抜粋]

3.4 過剰減衰による減音

(1) 実際の音の空気伝搬では、幾何条件による減衰即ち距離減衰よりも減音が大きくなる。この付加的な減音を過剰減衰と呼ぶ。その殆どが次のような自然条件に由来している。

空気吸収、雨や霧、気温分布、風、気温+風、大気の流れ、地面/樹木/建物、etc.

(2) まず空気吸収について。空気吸収による音の減衰は、粘性/熱による抵抗/分子運動による弛緩/振動による弛緩から生じる。低い周波数では微少で無視できるが、周波数が高くなると大きくなり無視できなくなる。また、乾燥して湿度が低いほど、気温が低いほど減衰量が大きくなる傾向がある。

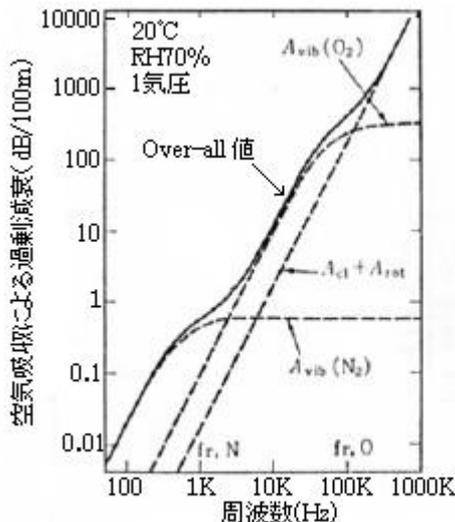


図-2.3.21 過剰吸収による音の減衰特性 (文献(6)抜粋)

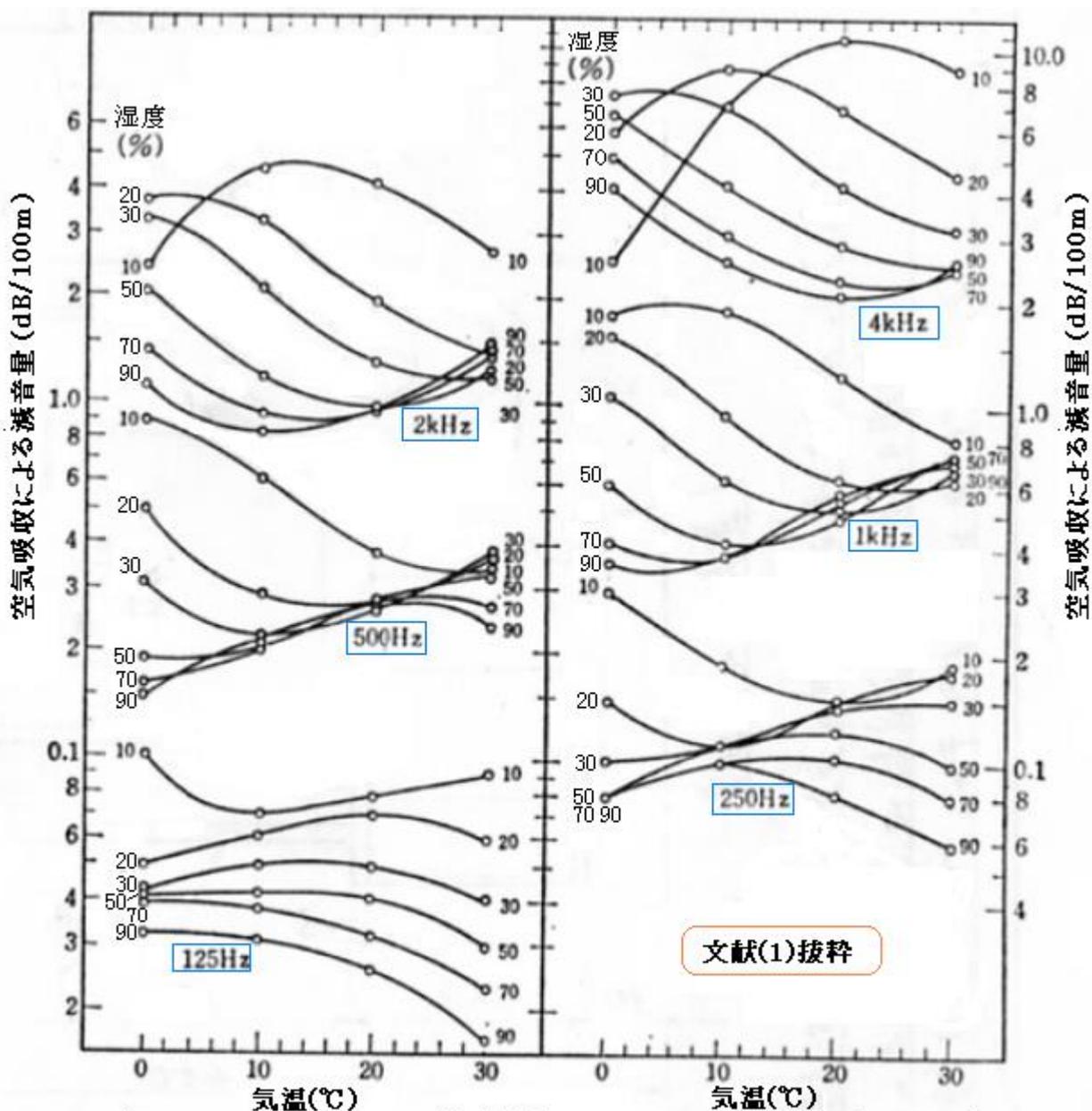


図-2.3.22 空気吸収による減衰値(ANSI Std S126/ASA28案-1978)

図-2.3.21は周波数-減衰量の関係を示している。プラント設備では2kHz~4kHzにピークがくることが多いが、この場合は距離100m当り1~2dB程度の減音が期待できる。図-2.3.22は米国規格(案)にてでてくるもので、周波数-気温-湿度-減衰量の関係を示しておりほぼ完結している。予測計算に使用できる(ただ旧版であるので要確認)。

- (3) 雨や霧の影響について。雨が降ると遠くまで音が到達するが、これは雨によって気温分布や風速分布が少なくなるためと思われる。図-2.3.23に水滴径-周波数-減衰量の関係を示す。水滴が小さくなると減衰量が大きくなる。低周波数域では空気中に水滴があるほど減衰量がアップするが、高周波数域では空気吸収が支配的になる(プラント設備では雨霧の影響は少ないと思う)。

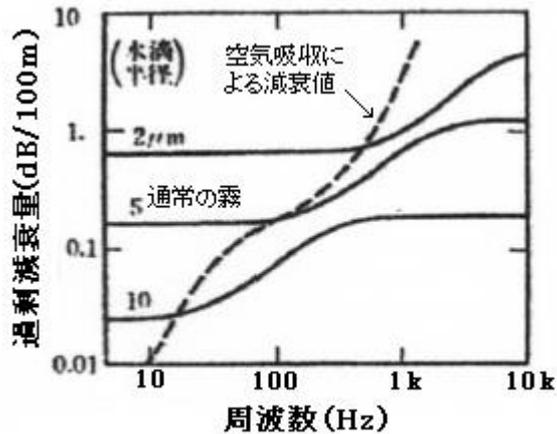


図-2.3.23 空気中の水滴による音の減衰

(4) 気温の影響について。昼間は上空が冷え地表が暖くなるが、音の伝播は温度に比例するので下図の図-2.3.24のように音は屈折して上方に向かい音の伝わりが悪い影部分ができる。影部分は音の減衰が著しい。一方夜間は、地表が冷え上空が暖かいので、音は地表に沿ってよく伝わり遠くまで到達する。夜間の大気放出操作には注意を要する。

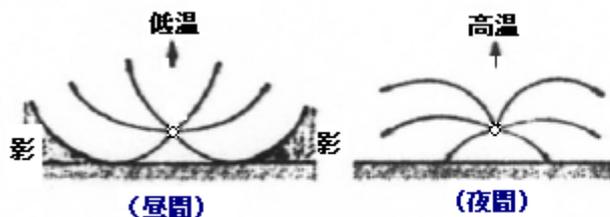


図-2.3.24 気温の上下分布による音の屈折
[文献(6)引用]

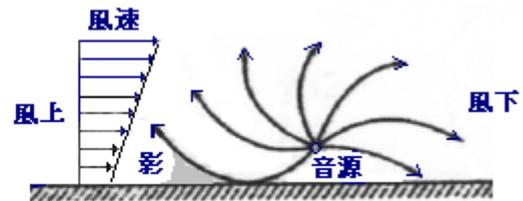


図-2.3.25 風による音の屈折
[文献(6)引用]

(5) 風の影響について。粘性抵抗があって地表近くでは風速が小さく、上空になるほど風速が大きくなる。また風上と風下を比べると音の伝播速度は音速+風速になるので、風上では上向きに屈折し、風下では下向きに屈折する。図-2.3.25はこれを示している。風上では音が伝わらない影部分ができ風下では影ができない。そのため風下の方が遠くまで音が伝搬する(減衰量が小さい)。

(6) 気温+風の影響について。例えば風速が1m/sであれば気温(気温勾配)の影響が支配的だが風速が1.5m/sを越えると風速の影響を含めて考える必要がある。種々データがあり概括できないが例えば過剰減衰量は普通、風下より風上の方が20~30dB大きくなる。事業地の統計データによるのがベターである。

(7) 大気の乱れの影響について。主に大気の乱れから発生音が変わらないのに受音点のSPLが大きく変動することがある(極端には35dB)。その傾向は風速変動によるものと類似性が強い。変動幅は、

- ・風下には周波数/距離の増加とともに増大。風上には影に近い所で最大。
- ・風の弱い晴れた夜間で±2.5dB、風の強い昼間で±7.5~10dB程度。

通常云われる減衰量(減音量)は平均値ベースなので、実際には変動幅±を考慮して減音量を見込む必要がある。

- (8) **地面/樹木/建物**の影響について。地面に吸音性があるとそれに沿って伝搬する音はかなり大きく減音する。降雪の場合も然り。音源/受音点が地表面に近い場合、直接音+反射音+地面波になるが、直接音と反射音は打ち消し合う傾向があり地面波に支配される。地面波は議論が多く予測は難しいが、地面に吸音性があると急激に減衰する。森林/植栽域では地面が多孔質になって吸音効果が著しい(10~25dB/100m)。事業地は一般に地盤が固められているので、減衰は殆ど期待できない。

樹木については回折効果とともに、高周波域での木の葉の同調作用によって減衰が著しい。**建物や地形的な突起**については回折による減衰が起きる。建物に拠っては反射性があるため 3dB ほど減音量が低下することもある。

3.5 多重音の合成

- (1) 通常、プラント設備では複数以上の卓越した音源があり、任意の受音点では、異なる音源からの音の強さ $I_i (i=1,2,3,\dots)$ が重なっており、当該ポイントの騒音はこれらの合成になる。この場合の合成音は以下のように得られる。

受音点の合成音の強さレベルは $L_{IC} = 10 \log\{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots)/I_0\}$ であるが、

$$L_{Ii} = 10 \log(I_i/I_0) \rightarrow (I_i/I_0) = 10^{L_{Ii}/10}$$

であるから、

$$L_{IC} = 10 \log(10^{L_{I1}/10} + 10^{L_{I2}/10} + 10^{L_{I3}/10} + \dots) \quad \text{-----(3-34)}$$

に変形できる。音の強さレベル L_I と音圧レベル L_p の関係は通常、 $L_I = L_p$ であるから、合成音圧レベル L_{pc} は、次のようになる。

$$L_{pc} = 10 \log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} + 10^{L_{p3}/10} + \dots) \quad \text{-----(3-35)}$$

【なお Word の都合で、" L_{p1} " と表示すべきところを " L_{p1} " と表示しているのも悪しからず、以下同じ】

- (2) この関係は、幾つかの音響出力レベルを合成するときも同じである。すなわち

$$L_{wc} = 10 \log(10^{L_{w1}/10} + 10^{L_{w2}/10} + 10^{L_{w3}/10} + \dots) = 10 \log\{\sum 10^{L_{wj}/10}\} \quad (j=1,2,3,\dots) \quad \text{-----(3-36)}$$

このように PWL レベルで複数音源を束ねる方法は、次のような場合に有効である。

- ① 音源がいくつか集合した音源エリアと受音点の間にかなり離隔があつて音源エリア内にある複数の音源をひとつの音源と見なしうる場合、
- ② ひとつの機器に幾つかの有力な音源が含まれておりこれらをひとつの音源とみなせるような場合(例えば本体+減速機+モータ)、
- ③ 拡散音場と見なされる室内に幾つかの音源が存在する場合 → 4.1 項で後述する。

- (3) ただ、 $\log \sum 10^{L_{pi}/10}$ は計算しにくい。以下に、 L_{pi} の計測結果から手早く合成音量を計算する方法を紹介しておく(これは旧くから現場で使われてきたもの?)。

2つの計測された L_{p1} 、 L_{p2} を合成すれば、 $L_{pc} = 10 \log(I_1/I_0 + I_2/I_0) = 10 \log[(I_1/I_0)\{1 + (I_2/I_1)\}]$
ここで $(L_{p1} - L_{p2})$ を ΔL とすれば、

$$\Delta L = 10\log(I_1/I_0) - 10\log(I_2/I_0) = -10\log(I_2/I_1) \rightarrow (I_2/I_1) = 10^{-\Delta L/10}$$

であるから、これを上式に代入して

$$L_{pc} = 10\log(I_1/I_0) + 10\log(1 + 10^{-\Delta L/10}) = L_{p1} + 10\log(1 + 10^{-\Delta L/10})$$

レベル差 ΔL を0~15にとると、この式の右辺第2項(α)は以下の値になる。

ΔL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
α	3.0	2.5	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
略値	3		2			1					0					

計測結果を昇順に並べ、 L_1, L_2, L_3, \dots とすれば、

$$L_1 + L_2 = L_1 + \alpha_{1-2} = L_{1-2} \quad (\Delta L = L_1 - L_2 \text{ として } \alpha_{1-2})$$

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_{1-2} + \alpha_{1-3} = L_{1-3} \quad (\Delta L = L_{1-2} - L_3 \text{ として } \alpha_{1-3})$$

$$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = L_{1-3} + \alpha_{1-4} = L_{1-4} \quad (\Delta L = L_{1-3} - L_4 \text{ として } \alpha_{1-4})$$

$$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 = L_{1-4} + \alpha_{1-5} = L_{1-5} \quad (\Delta L = L_{1-4} - L_5 \text{ として } \alpha_{1-5})$$

.....
.....

- (4) 騒音計の計測による各オクターブバンドの騒音レベル(A特性音圧レベル)からオーバーオールな騒音レベルを求めるときにも、上記の合成方法は使用できる。ここでは、下記の計測データから(3-35)式を用いて合成音を求めてみる。

OB 中心周波数(Hz)	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
計測音圧レベル(C特性)	52	63	60	54	54	58	60	53	44
A特性補正值	-39	-26	-16	-9	-3	0	1	1	-1
補正音圧レベル(A特性)	13	37	44	45	51	58	61	54	43

$$\begin{aligned} L_{pc} &= 10\log(10^{13/10} + 10^{37/10} + 10^{44/10} + 10^{45/10} + 10^{51/10} + 10^{58/10} + 10^{61/10} + 10^{54/10} + 10^{43/10}) \\ &= 10\log(20 + 5012 + 25119 + 31623 + 125893 + 630957 + 1258925 + 251189 + 19953) \\ &= 63.7 \rightarrow 64\text{dB(A)} \end{aligned}$$

4. 屋内及び屋内-屋外における音の空気伝搬

4.1 屋内における伝搬⁽⁵⁾

- (1) 屋外の空気伝搬では分散のみを考えればよいが、屋内の空気伝搬では反射の要素が加わる。室内に例えばダクトの吸込み口/吹出し口(点音源扱い)があるとき室内の任意点に生じる音圧レベルは、次式によって推定できる⁽⁵⁾(補足6参照のこと)。

$$L_p = L_w + 10\log\{Q/(4\pi r^2) + 4/R\} \quad \text{-----}(4-1)$$

ここで、 L_p = 音源から距離 r の位置にある受音点の SPL(dB)

L_w = 音源から放射される PWL(dB)、 r = 音源~受音点の距離(m)、

Q = 指向性係数(-)(図 8-9 参照)、 R = 室定数[$= S\alpha/(1-\alpha)$]

S = 室の全内表面積(m²)(*)、 α = 室内の平均吸音率[$= \sum \alpha_j S_j / \sum S_j$]

α_j = j 番目の壁材の吸音率、 S_j = j 番目の壁材の面積(m²)、 $j=1,2,3,\dots$

平均吸音率には表 8-1 のようなデータがある(なお吸音率については補足7を参照)。

右辺第2項の傾向は 図 8-10 に示される。(4-1)式の右辺第2項において、

$Q/(4\pi r^2) \rightarrow$ 直接音の伝播、 $4/R \rightarrow$ 間接音の伝播

を表わしている。直接音は音源から直接伝播してきたもの(距離 r に依存)、また間接音は音源からの放射音が壁などで反射して間接的に伝播してもの(壁面の吸音度に相当する R に依存)である。

指向係数 Q は、3.1 項でも述べたように音の方向性依存を示している(ただこの場合は屋内に限る)。分母の距離 r や室定数 R が大きくなるにつれて第 2 項は縮退してゆき(一側に増加)、受音点の SPL (L_p)は低下する。即ち音源からの距離が遠のくにつれて、また壁面の吸音度が挙がるにつれて騒音は減少する。

図 A5 は、 $Q=1$ としたときの第 2 項を曲線で表わしたものであるが、距離 r の小さい近距離の場合は曲線が平坦になっており、距離 r が殆ど効いていない。特に室定数 R が小さくなるにつれて、この傾向は顕著になる。例えば $R=5$ では、 $+1 \sim -1$ dB の範囲にある。このように直接音が間接音に呑み込まれてあたかも間接音に支配されているような音場を**拡散音場**と呼んでいる(逆に直接音が間接音とまだ並存するような音場を、ここでは**非拡散音場**と仮称する)。

拡散音場は、次の場合に成立する。

- ・ 壁面の吸音効果が少なく反射が大きいとき
- ・ 音源から受音面までの距離が十分長いとき

拡散音場では $[Q/(4\pi r^2)]$ 項は無視できるので、(1)式は、

$$L_p = L_w + 10\log(4/R) = L_w + 10\log[4(1-\alpha)/(S\alpha)] \quad \text{-----}(4-2)$$

なおこの音場では、平均吸音率 α はかなり低いので、 $(1-\alpha) \rightarrow 1$ として

$$L_p = L_w + 10\log[4/(S\alpha)] = L_w + 10\log(4/A) \quad (\text{但し } A = S\alpha) \quad \text{-----}(4-3)$$

が使われることが多い。

A は吸音力で面積(m^2)の単位を持ち反射可能面積を表している。各壁材の占有面積 S_j とその吸音率 α_j が既知で、人などの柔らかい存在物が常在するなら、次の式を用いてカウントしてもよい。

$$A = \sum S_j \alpha_j + a_i \quad (\text{但し } a_i = \text{存在物の吸音力})$$

また、計測によって**残響時間 T** (室内の SPL が 60dB に減衰するまでの時間)を計測して次式で計算してもよい(4)。

$$A = (4\log_e 10^6/c)(V/T) \doteq 0.16V/T \quad (\text{常温}) \quad \text{-----}(4-4)$$

ここで $V =$ 室の容積(m^3)、 $T =$ 残響時間(sec.)

室内に音源が多数ある場合は少し面倒になる。ただ、室内が拡散音場と見なせるときは、音源の散らばりは無視できるので、(3-36)式から合成 PWL を求め(4-1)~(4-3)式に適用して SPL を計算すればよい。

(*)全内表面積は側壁+天井+床の延べ面積を云う。

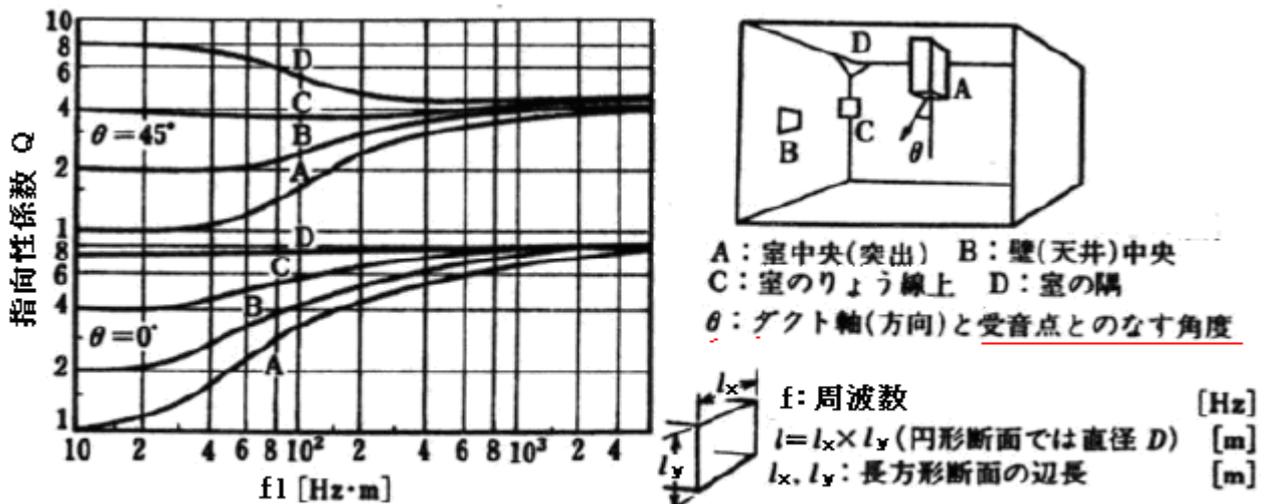


図8-9 指向性係数(ASHRAE) → American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineer)

L_p : 発音源から距離 r の点の音圧レベル [dB]

L_w : 発音源のパワーレベル [dB]

(注) 縦軸の相対音圧レベルは右辺第2項に該当する。

$$(L_p - L_w) = 10 \log [Q / (4\pi r^2) + 4/R]$$

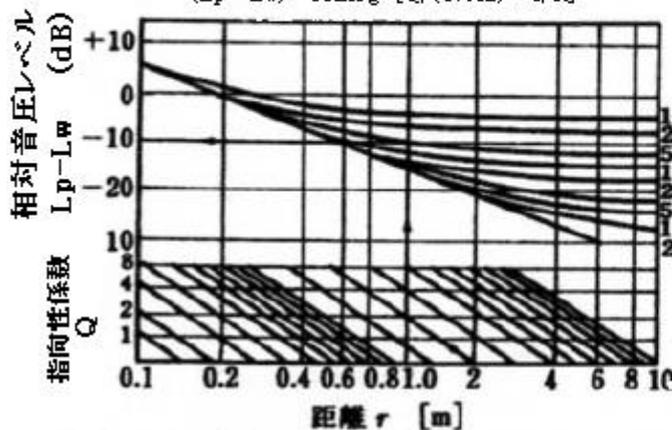
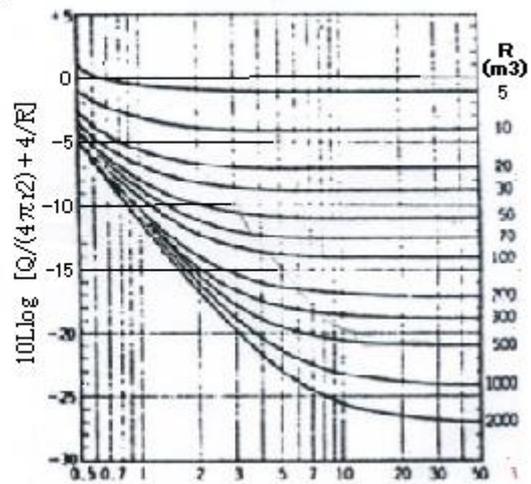


図8-10 室内での音の拡散(ASHRAE, 1980)²⁾

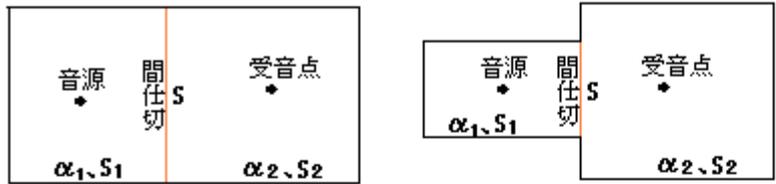


図A5 (Q=1のとき)

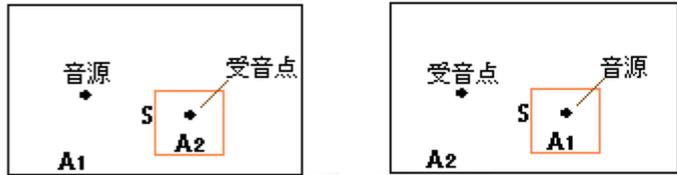
表8-1 一般事務室の平均吸音率(板本守正, 昭51)

$\bar{\alpha}$	内装の目安	内装材の例		
		壁	天井	床
0.05	吸音材をまったく使っていない室	モルタル	モルタル	モルタル
0.10	吸音材を使っていない室	プラスチック塗り	プラスチック塗り	Pタイル
0.12	天井に吸音材を使った室	プラスチック塗り	空気層+穴あき吸音板	Pタイル
0.15	壁・天井に吸音材を使った室	ロックウールボード	空気層+穴あき吸音板	Pタイル
0.25	壁・天井・床に吸音材を使った室	空気層+繊維板	空気層+グラスウール+穴あき吸音板	カーペット
0.40	特殊な吸音処理を施した室	特殊	特殊	特殊

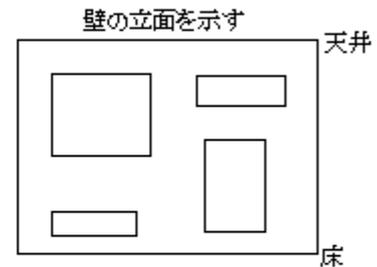
(2) 以上は、同一の室内に音源と受信点がある場合である。更に室内にある音源と受信点が壁や間仕切間仕切(壁)で隔てられている場合を考える。これには次図のようなパターンがある。なおいずれも室内は拡散音場になっているとする。



(a) 間仕切タイプ (平面)



(b) 中子タイプ (平面)



(d) 仕切りが多種の遮音構造から構成される場合



(c) 音源側の平均SPLが既知の場合 (平面)

(a)の間仕切タイプと(b)の中子タイプは、構造は異なっているが、いずれも間仕切/中子壁で区切られているので機能的には同じ音響構造とみなせる。この場合、受信点の SPLは次の通り。

$$L_p = L_w - TL + 10 \log \{4S / (A_1 A_2)\} \quad \text{-----(4-5)}$$

ここで、TL=間仕切/仕切壁の等価損失(dB)、S=間仕切/仕切壁の面積(m²)、
A₁, A₂=音源側、受信側の平均吸音力(m²)(=S₁α₁, S₂α₂)、

(c)は、PWLの代わりに音源側の SPLが既知の場合、受信点における SPLは次の通り。

$$L_p = L_{p1} - TL + 10 \log (S/A_2) \quad \text{-----(4-6)}$$

ここで、L_{p1}=音源側の室内の SPL(dB)、TL, S, A₂は(4-5)式に同じ

(d)は、間仕切りや仕切り壁が単一の遮音構造ではなく、多種の構造になる場合である(例えば窓やドアなどがある場合である)。このときの受信点の

$$L_p = 10 \log (\sum 10^{L_{pj}/10}) \quad \text{-----(4-7)}$$

$$L_{pj} = L_w - TL_j + 10 \log \{4S_j / (A_1 A_2)\}$$

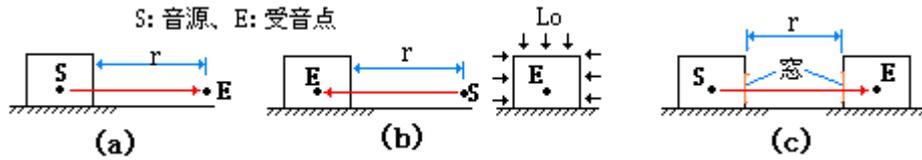
ここで、L_{pj}=j番目の遮音構造の SPL(dB)、TL_j=j番目の遮音構造の透過損失(dB)、
S_j=j番目の遮音構造部分の面積(dB)、A₁, A₂は(4-5)に同じ。

なお音源が複数あるときの処理は、前(1)項の記述に同じ。(4-5)~(4-6)式の導出については[補足 8](#)を参照のこと。

4.2 屋内－屋外における伝搬

(1) 建屋(あるいは防音カバー)の内部と外部の音の伝搬には、次のようなパターンがある。

- ① 屋内の音源 → 屋外の受音点への伝搬 [下図の(a)]
- ② 屋外の音源 → 屋内の受音点への伝搬 [下図の(b)]
- ③ 離隔した建屋の対向窓越しの伝搬 [下図の(c)]



これらの代表パターンについて音の伝搬式を示す(補足9参照)。なおいずれの場合も、屋内は拡散音場として扱い、(4-3)式 $[L_p = L_w + 10 \log(4/A)]$ が成立するものとする。

(2) まず ①の場合、各位置における SPL は次のようになる。

$$\text{距離 } r \text{ の位置にて: } L_p = L_w - TL + 10 \log(S_0/A) + 10 \log\{1/(2\pi r^2)\} \quad \text{-----(4-8a)}$$

$$\text{建屋のすぐ外にて: } L_p = L_w - TL + 10 \log(1/A) \quad \text{-----(4-8b)}$$

ここで S_0 = 建屋外面の面積(m^2)、 A = 建屋内の吸音力(m^2)、 r = 建屋外面～受音点までの距離(m)、なお、建屋内の SPL は、(4-3)式による。

音源は点音源で半自由空間($Q=2$)と仮定している(以下同じ)。なお建屋壁が不均一で数種の材料でできている時は、(4-8)式の吸音率 A と透過損失 TL を記の式でカウントする。

$$A = \sum \alpha_j S_j, \quad TL = 10 \log\{\sum S_{0j} / (\sum S_{0j} \tau_j)\}$$

ここで、 α = 当該壁材エリアの吸音率(m^2)、 S = 当該壁材エリアの内表面積(m^2)、

S_0 = 当該壁材エリアの外表面積(m^2)、 τ = 当該壁材の透過率、 $j=1,2,3,\dots$

なお、建屋壁の小さな窓からのみ音が漏れ出るような場合でも、 S_0 を小窓の面積に割り当てて(4-8)式で SPL を計算できる。 S_0 は小さくなるので、受音点の SPL は小さくなる。

(3) ②の場合、内部の受音点の SPL は上式と全く同じ形になる。

$$L_p = L_w - TL + 10 \log(S_0/A) + 10 \log\{1/(2\pi r^2)\} \quad \text{-----(4-9)}$$

S_0, A は(4-8a)に同じ。建屋壁のすぐ外では、 $L_{p1} = L_w + 10 \log\{1/(2\pi r^2)\}$ になる。

外部音源が拡散している状態では、内部の受音点の SPL は次の通り。

$$L_p = L_0 - TL + 10 \log(S_0/A) \quad \text{-----(4-10)}$$

ここで L_0 = 屋外拡散音の SPL(dB)、 S_0, A は(4-8a)に同じ。

(4) ③の場合の伝搬式は次による。

$$L_p = L_w - (TL_1 + TL_2) + 10 \log\{S_1 S_2 / (A_1 A_2)\} + 10 \log\{1/(2\pi r^2)\} \quad \text{-----(4-11)}$$

ここでサフィックス 1,2 はそれぞれ”音源側”, ”受音点”を意味する。

5. ダクト境界における伝搬

配管やダクトは内部流れを持ち流体音を発生させると共に、侵入音や発生音を伝搬して減衰させる。即ち発生と減衰が混在している。この流路内に生じるプロセスについては複雑であり、別途情報や議論を整理する必要がある。ここではダクト設備の境界における音の伝搬について記す。

(1) ダクト内にあるいはダクト外に透過する騒音のPWLについて⁽⁵⁾

著しい騒音を持ったダクトがある区間だけ屋外を通過するとき、ダクト騒音を大気に放出する。この場合、放出騒音のPWLがわかれば、例えばその区間のダクトを線音源として扱って、放出音の伝搬を検討することができる。ASHRAEはこの放出騒音のPWLについて次式を与えている(補足9参照)。

$$L_{wr} = L_{wi} - TL_0 + 10 \log(P \cdot le / S) \quad \text{-----(5-1)}$$

ここで、 L_{wr} =ダクト壁から外部に透過するPWL(dB)、 L_{wi} =ダクト入口のPWL(dB)、
 TL_0 =ダクト内からダクト外への透過損失(dB)→矩形断面につき表8.15参照
 P =ダクト周長(m)、 le =ダクト長さ(m)、 S =ダクト流れ断面積(m²)

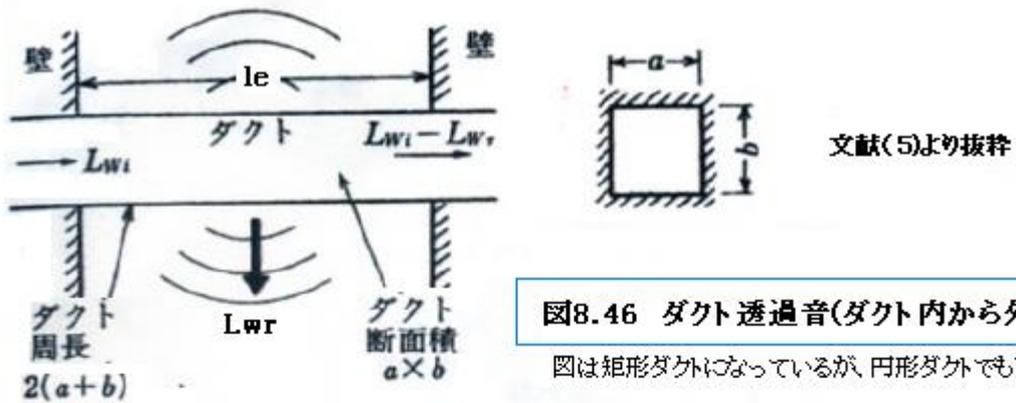


図8.46 ダクト透過音(ダクト内から外)

図は矩形ダクトになっているが、円形ダクトでも可

文献(5)より抜粋 表8-15 長方形断面ダクトの TL_{out} (ASHRAE, 1991)⁽⁴⁵⁾ (注) ダクト長さ6m当り[dB]

ダクトの種類		オクターブバンド中心周波数 [Hz]							
断面 [mm]	板厚 [mm]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
300×300	0.7 (24 ga)	21	24	27	30	33	36	41	45
300×600	0.7 (24 ga)	19	22	25	28	31	35	41	45
300×1200	0.85 (22 ga)	19	22	25	28	31	37	43	45
600×600	0.85 (22 ga)	20	23	26	29	32	37	43	45
600×1200	1.0 (20 ga)	20	23	26	29	31	39	45	45
1200×1200	1.3 (18 ga)	21	24	27	30	35	41	45	45
1200×2400	1.3 (18 ga)	19	22	25	29	35	41	45	45

文献(5)より抜粋 表8-16 長方形断面ダクトの TL_w (ASHRAE, 1991)⁽⁴⁷⁾ (注) ダクト長さ6m当り[dB]

ダクトの種類		オクターブバンド中心周波数 [Hz]							
断面 [mm]	板厚 [mm]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
300×300	0.7 (24 ga)	16	16	16	25	30	33	38	42
300×600	0.7 (24 ga)	15	15	17	25	28	32	38	42
300×1200	0.85 (22 ga)	14	14	22	25	28	34	40	42
600×600	0.85 (22 ga)	13	13	21	26	29	34	40	42
600×1200	1.0 (20 ga)	12	15	23	26	28	36	42	42
1200×1200	1.3 (18 ga)	10	19	24	27	32	38	42	42
1200×2400	1.3 (18 ga)	11	19	22	26	32	38	42	42

表8-15、8-16はダクト表面に防音ラギングなどの措置がない場合のデータと思われる。

一方、騒音のないダクトが騒音の著しい場所(機械室など)を通過すると、逆に騒音を吸収する。この場合、ダクト内に吸収される騒音のPWLは次式で見積ることができる⁽⁵⁾。

$$L_{wt} = L_{wi} - TL_{in} - 3 \quad \text{-----(5-2)}$$

$$L_{wi} = L_p + 10 \log A_o - 6$$

ここで L_{wt} = ダクト側壁から内部に透過するPWL(dB)、

L_{wi} = ダクト総表面積に入射する騒音のPWL(dB)、

TL_{in} = ダクト外から内への透過損失(dB) → 矩形断面につき表 8.16 参照

L_p = ダクト内の通過空間の拡散音圧レベル(dB)、 A_o = ダクトの総表面積(m²)、

(2) ダクトが室内に入入りする場合の騒音について⁽⁶⁾

室内に音源があると空調ダクトの吸込口では騒音の侵入が起きる[下図(a)参照]。この場合、

・室内が拡散音場になるとき： $L_{wd} = L_w + 10 \log(S_d/A)$ -----(5-3a)

・室内が非拡散音場になるとき： $L_{wd} = L_w + 10 \log S_d + 10 \log\{Q \cos \theta / (4 \pi r^2) + 4/R\}$ ----(5-3b)

ここで L_{wd} = ダクト系への入射PWL(dB)、 L_w = 音源のPWL(dB)、 S_d = ダクト等の開口面積(m²)、

A = 吸音力(m²)、 R = 室定数、 Q = 指向係数、 θ = 傾角(°)、 r = 音源～吸込口の距離(m)

A, R は前節の(4-1)式に定義の通り。 Q は図 A-2 の点音源の Q による。

また、騒音を持った空調ダクトの開口では騒音の放出が起きる[下図(b)参照]。この場合、

・室内が拡散音場になるとき： $L_p = L_{wo} + 10 \log(4/A)$ -----(5-4a)

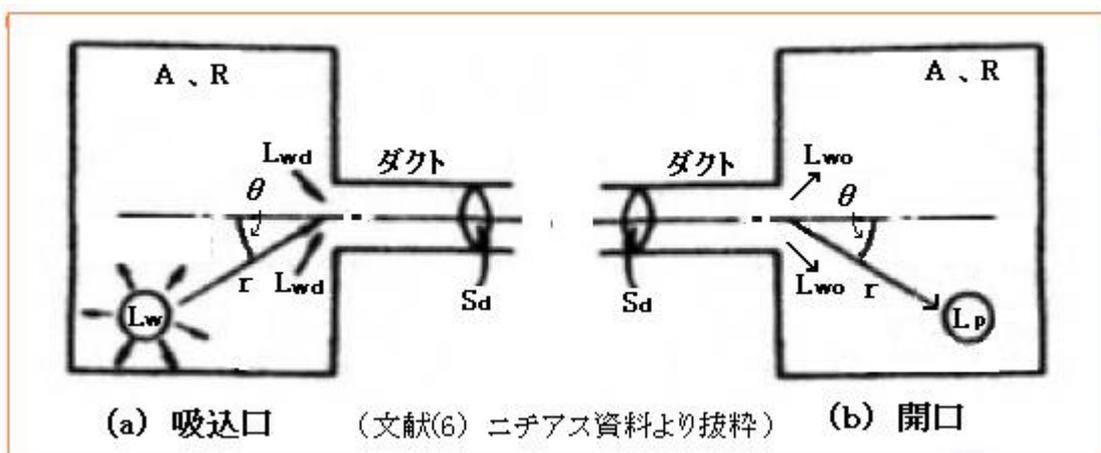
・室内が非拡散音場になるとき： $L_{pr} = L_{wo} + 10 \log\{Q \cos \theta / (4 \pi r^2) + 4/R\}$ ----(5-4b)

ここで、 L_p = 受信室の平均SPL(dB)、 L_{pr} = 受信室内の特定の受信点のSPL(dB)、

L_{wo} = ダクト開口より室内の放射されるPWL(dB)、 r = 開口～受信点の距離(m)

A, Q, R は前述に同じ。

(5-4a),(5-4b)式は、(4-3),(4-1)式に実質、同じ。



(3) 吸音材を内張りしたダクトの吸音効果(参考)

音の空気伝搬というテーマからは外れるが、ダクト内の気体を媒体とした音の伝搬ということで室内の空気伝搬に類似している。そこで参考として、その伝搬式⁽⁶⁾を紹介しておく。

① 吸音材内張りダクトの減衰量 [下図(a)参照]

$$\Delta L_w = 1.05 \alpha^{1.4} \{P/(S_d)\} l_e \quad \text{-----(5-5)}$$

ここで ΔL_w = 減衰量(dB)(=入口 PWL - 出口 PWL)、 α = 内張り材の吸音率(-)

P = 周長さ(m) [= $2(a+b)$]、 S_d = ダクト流路断面積(m²)、 l_e = 内張り区間長さ(m)

② 吸音チャンバの減衰量 [下図(b)参照]

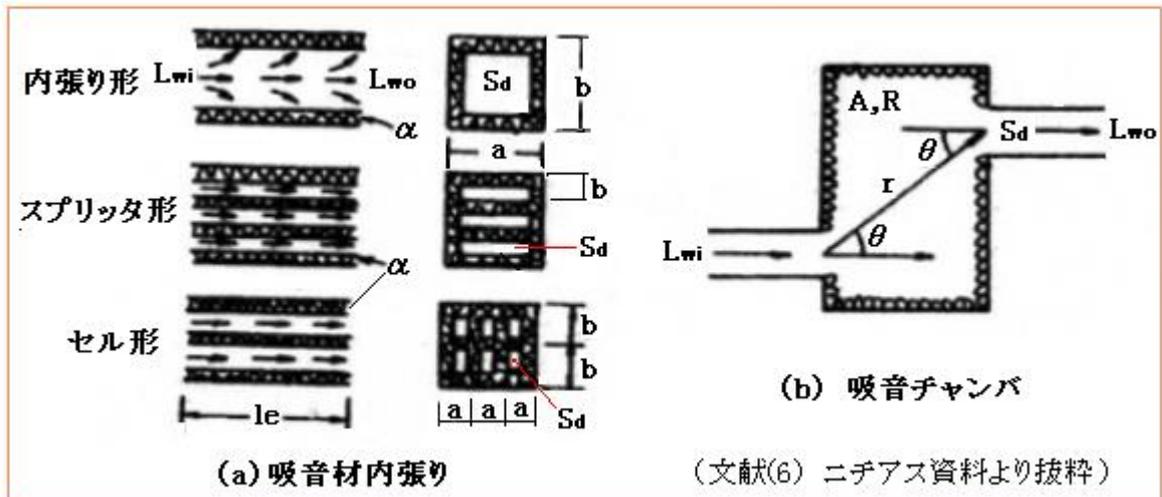
チャンバ内が拡散音場のとき : $\Delta L_w = 10 \log(A/S_d)$ -----(5-6)

チャンバ内が非拡散音場のとき : $\Delta L_w = -10 \log\{\cos \theta / (4\pi r^2) + 1/R\}$ -----(5-7)

ここで ΔL_w = 減衰量(dB) [= $L_{wi} - L_{wo}$]、 L_{wi} = 入口 PWL、 L_{wo} = 出口 PWL

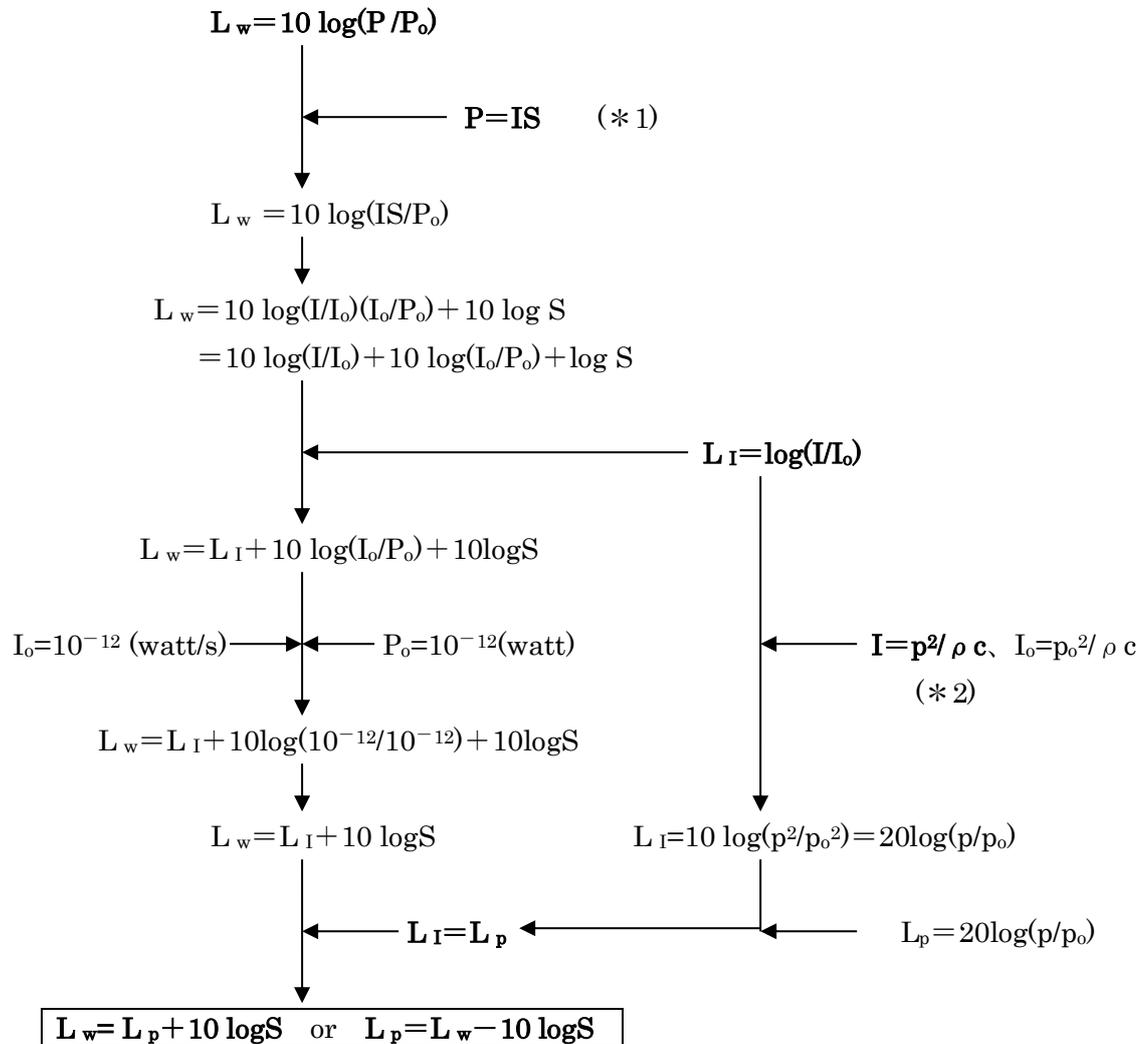
S_d = 出口側ダクト流路断面積(m²)、 A = チャンバ室の吸音力(m²)、

R = 室定数(m²)、 r = チャンバ入口～出口間の距離(m)、 θ = 傾角(°)、



[補足 1 音響出力レベル(L_w)と音圧レベルの関係式の導入(2)]

(2-4)式は、放射による減音(距離減衰)の基礎式である。これは以下のように導かれている。但し平面(進行)波をベースにしているの、注意のこと。



(*1) 音響出力(音響パワー) P は、伝搬過程で損失がなければ、単位放射面積当たり音の強さ I に全放射面積 S を乗じたものに等しくなる。

(*2) 音波が一方向に伝播するとき $p/u = \rho c \rightarrow u = p/\rho c$ の関係がある。平面進行波の場合、音の強さは $I = pu$ であるから、 $I = p^2/\rho c$ になる。

[補足 2 音の伝搬計算のタイプと騒音レベルとの関係⁽²⁾⁽⁸⁾]

騒音計測ではたいてい**周波数分析**が行われ、例えば音響出力が不明の場合は、最寄の位置で周波数分析を行い周波数帯域毎の **SPL** を計測し、(2-4)式の関係から当該音源の周波数帯域毎の **PWL** スペクトルを割り出している。この場合、周波数帯域とは約 25~10kHz の周波数域を区間で分割したものを云い、区間の中心周波数(下記)でその帯域を表示している。

オクターブバンド： 31.5、63、125、250、500、1k、2k、4k、8k (Hz)

1/3 オクターブバンド : 25、31.5、40、50、63、80、100、125、160、200、250、315、
400、500、630、800、1k、1.25k、1.6k、2k、2.5k、3.15k、
4k、5k、6.3k、8k、10k

これら帯域の SPL には A 特性と C 特性がある。C 特性 SPL は理論上の SPL にかなり近い。一方 A 特性 SPL は、理論上の SPL を人間の耳の感覚で聴感補正したもので、騒音レベルと呼ばれ、騒音度の指標として用いられる。また dBA あるいは dB(A) と表示され、理論上の SPL の dB 表示と区別されている。これら特性値(分析器のレスポンス)の傾向と聴感補正値を下記に示す。

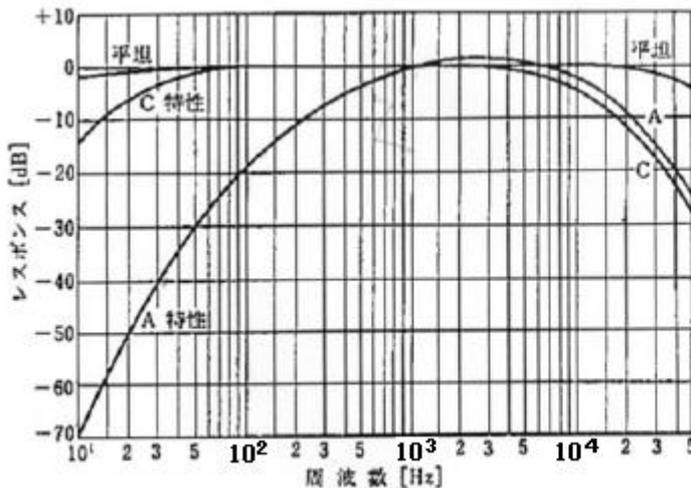


図1.1.3 騒音計の電氣的周波数レスポンス [文献(2)抜粋]

周波数(Hz)	補正(dB)
31.5	-39.4
63	-26.2
125	-16.1
250	-8.6
500	-3.2
1k	0
2k	1.2
4k	1.0
8k	-1.1

表1.1.2 A特性の周波数補正特性
(オクターブバンドの場合)
[文献(2)抜粋]

周波数分析は PWL の特定のみならず、騒音評価でも重要である。騒音規制値は騒音レベル即ち dBA で表示されるから、試運転時これを確認するには周波数分析をおこなって騒音レベルを求める必要がある。しかしこの場合重要なのは、騒音が dBA で規制されるために、音源と目される機器については A 特性の PWL データが必要になることである。事実、機器の PWL データ/算定式は dBA 表示であることが多い。

この場合、PWL データとしては、試運転後の確認計測を見込んで各周波数帯域に対して dBA で与えられるのがベストであるが、残念ながら、多くのデータはオーバーオール騒音レベル(dBA)で与えられている。その場合、オーバーオール値の PWL を用いて伝搬計算した結果は、dBA 単位ということになる(注意!)。しかし、機器類の PWL データには聴感補正されていない dB 単位のものもある。この場合、減音計算の結果は dB 単位になるので受音点を dBA で評価できない。ただ、dBA は表 1.1.2 を見れば判るように 500Hz 以下では(-)補正、1kHz~4kHz ではわずかに(+)補正になっている。一般に 500Hz 以下でピークになることは稀れで、むしろ 1~4kHz 辺りでピークになることが多い。従って計算値 85dB を 87dB という風に、若干(+)補正をしておけば、dB 単位でもあっても dBA 規制値に対して評価可能と思う。

[補足 3 各種音源における距離減衰式の導入⁽¹⁾⁽³⁾]

(1) 点音源の場合、自由空間における放射面は球面になるので $S=4\pi r^2$ 。従って(2-4)式は、

$$L_p = L_w - 10 \log(4\pi r^2) = L_w - \log r^2 - 10 \log 4\pi = L_w - 20 \log r - 11$$

になる。自由空間のどこかに反射面があつて反射音(間接音)が加わると、 L_p は低下して見掛けの放射面積(S')は小さくなる。そこで $Q = S/S'$ とおけば $S' = S/Q$ となりこれを(2-4)式に代入することで、(3-1)式が得られる。すなわち、

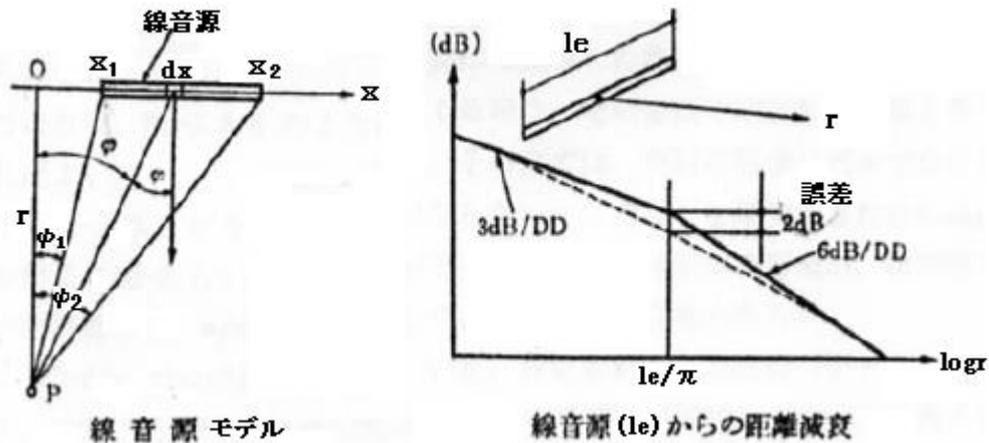
$$L_p = L_w - 10 \log(S/Q) = L_w - 10 \log S + 10 \log Q = L_w - 20 \log r - 11 + 10 \log Q$$

ここで Q は指向係数であり、 $10 \log Q$ は指向指数(DI)である。 Q については、補足5で説明する。

- (2) 配管/ダクトの類いは線音源と見なされる。非常に長くて無限長とみなされる場合は、 $S = 2\pi r$ であるから、同様に次の式が得られる。

$$L_p = L_{w1} - 10 \log r - 8 + 10 \log Q \quad \text{但し } L_{w1} \text{ は単位長さ当りの PWL}$$

しかし実際に無限長に近い配管ダクトはなく有限長さで扱った方がよい。以下文献(1)の引用による。



上図左の音源モデルに対して、受音点(P)の音響エネルギー密度は次式で与えられる。

$$E = \int P / \{4\pi(r^2 + x^2)c\} dx = \{P/(4\pi c)\} (1/r) \{ \tan^{-1}(x_2/r) - \tan^{-1}(x_1/r) \} = \{P/(4\pi c)\} \{ (\phi_2 - \phi_1)/r \}$$

但し、積分範囲 $x_1 \sim x_2$ とする。 P は単位長さ当りの音響出力とする。

$x_1 = -x_2 = le/2$ のときは、この式は $E = \{P/(4\pi c)\} (1/r) \{ \tan^{-1}\{le/(2r)\} \}$ になる。ここで

$$r \ll le \text{ のとき } \rightarrow \tan^{-1}\{le/(2r)\} \doteq \pi/2 \quad \text{故に } E = \{P/(8c)\} (1/r) \quad (\text{近いとき})$$

$$r \gg le \text{ のとき } \rightarrow \tan^{-1}\{le/(2r)\} \doteq le/(2r) \quad \text{故に } E = \{P \cdot le/(8\pi c)\} (1/r^2) \quad (\text{遠いとき})$$

等値して、 $r = le/\pi$ が得られる。これは上図右のように、近い距離で上図(右)で倍距離 3dB、遠い距離で倍距離 6dB の減衰で近似できる(*)。故に $r < le/\pi$ では線音源扱い、 $r \geq le/\pi$ では点音源扱いにする。無限長の線音源の例に従えば、すなわち

$$r < le/\pi : L_p = L_{w1} + 10 \log\{Q/(2\pi r)\} = L_{w1} - 10 \log r - 8 + 10 \log Q$$

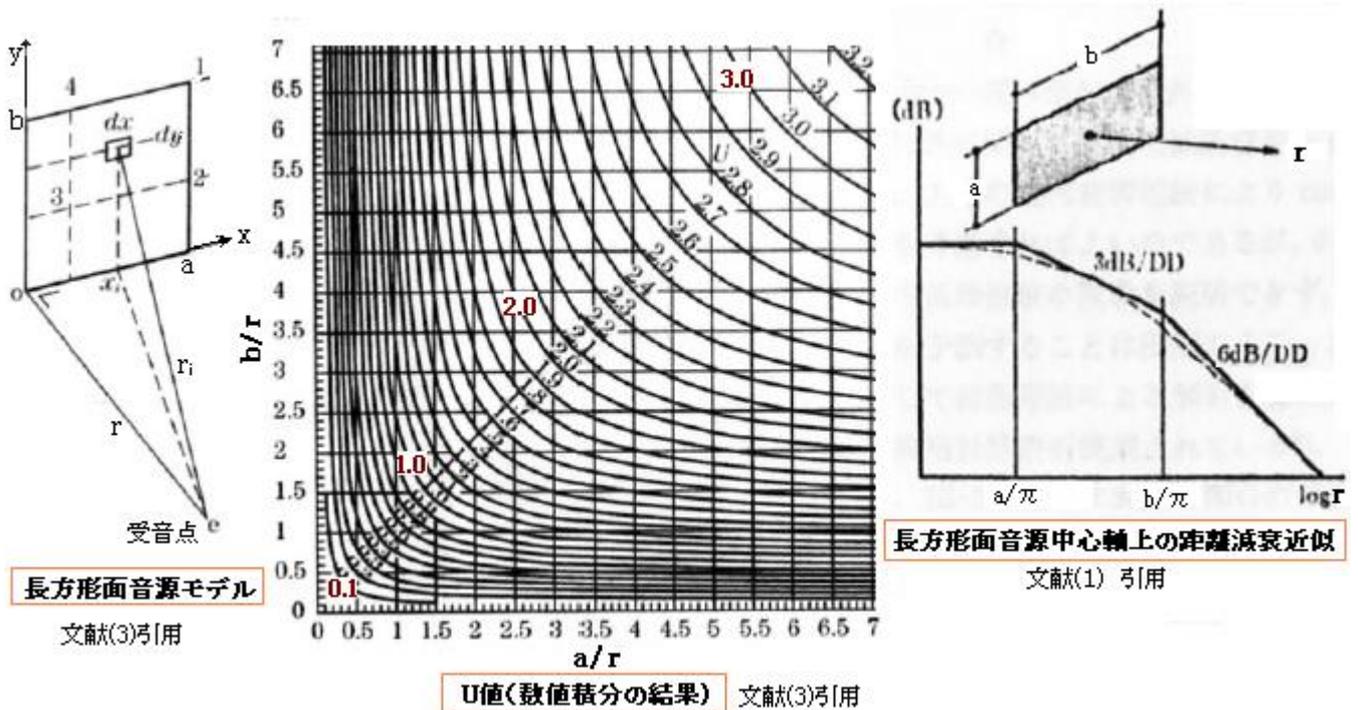
$$r \geq le/\pi : L_p = L_w + 10 \log\{Q/(4\pi r^2)\} = L_w - 20 \log r - 11 + 10 \log Q$$

全 PWL [$L_w = L_{w1} \cdot le$] をとれば、 $L_{w1} = L_w / le$ であるから、

$$r < le/\pi : L_p = L_{w1} + 10 \log\{Q/(2\pi r \cdot le)\} = L_{w1} - 10 \log r - 10 \log le - 8 + 10 \log Q$$

(*) 倍距離とは距離 r を 2 倍にとった場合、即ち $10 \log(2r/r) = 10 \log 2 = 3 \text{ dB}$ 、 $10 \log(2r/r)^2 = 6 \text{ dB}$

- (3) 広い壁面から放射される場合、面音源と見なされる。以下、文献(3)の引用による。



上図左の音源モデルに対して、受音点の音響エネルギー密度は次式で与えられる。

$$E = \iint (P / (2\pi r_i^2 c)) dx dy = P / (2\pi c) \iint \{1 / (x^2 + y^2 + r^2)\} dx dy \quad (\text{積分範囲 } 0 \sim a, 0 \sim b)$$

ここで P = 単位面積当たりの音響出力。これを用いて受音点の音圧レベルは、

$$L_p = L_w - 8 + 10 \log U$$

$$U = \iint \{1 / (1 + X^2 + Y^2)\} dX dY \quad (\text{積分範囲 } 0 \sim a/r, 0 \sim b/r), X = x/r, Y = y/r$$

U をグラフ化すると、上図中央のようになる。この U を用いて L_p をプロットすると上図右のようになり、近似的に $a/\pi < r < b/\pi$ で $3\text{dB}/\text{倍距離}$ (*)、 $r > b/\pi$ で $6\text{dB}/\text{倍距離}$ になる。故に $a/\pi < r < b/\pi$ では線音源扱い、 $r > b/\pi$ では点音源扱いにする。すなわち

$$a/\pi \leq r \leq b/\pi : L_p = L_w - 10 \log \{(2\pi r b) / Q\} = L_w - 10 \log r - 10 \log b - 8 + 10 \log Q$$

$$r > b/\pi : L_p = L_w - 10 \log \{(4\pi r^2) / Q\} = L_w - 20 \log r - 11 + 10 \log Q$$

なお、 $r < a/\pi$ では、

$$I = PQ / (2ab) \rightarrow 10 \log (I/P) = L_p - L_w = 10 \log Q - 10 \log (2ab) \rightarrow L_p = L_w - 10 \log (2ab) + 10 \log Q$$

[補足 4 受音点間の音圧レベル差の導出]

(1) 点音源の場合、自由空間における放射面は $S = 4\pi r^2 / Q$ 。従って(3-7)式は、

$$L_{p1} - L_{p2} = 10 \log \{(4\pi r_2^2) / (4\pi r_1^2)\} = 20 \log (r_2 / r_1)$$

(2) 線音源の場合、2つの受音点が、線音源扱い域($r_1, r_2 < l_e / \pi$)ないし点音源扱い域($r_1, r_2 \geq l_e / \pi$)にあるときは上記と同様に、

$$\text{線音源}(r_1, r_2 < l_e / \pi) : L_{p1} - L_{p2} = 10 \log (r_2 / r_1), \text{面音源}(r_1, r_2 \geq l_e / \pi) : L_{p1} - L_{p2} = 20 \log (r_2 / r_1)$$

2つの受音点が、線音扱い域—点音源扱い域にまたがるときは以下の通り。

$$L_w = L_{p1} + 10 \log(2 \pi r_1 \cdot l_e) = L_{p2} + 10 \log(4 \pi r_2^2) \quad \text{但し 自由空間(反射面なし)} Q=1$$

故に

$$\begin{aligned} L_{p2} - L_{p1} &= 10 \log(2 \pi r_1) + 10 \log l_e - 10 \log(4 \pi r_2^2) \\ &= 10 \log(2 \pi r_1) - 10 \log l_e + 20 \log l_e - 10 \log(4 \pi r_2^2) \\ &= -10 \log\{1/(2 \pi r_1)\} - 10 \log l_e + 20 \log l_e - 10\{\pi^2 r_2^2 / (\pi/4)\} \\ &= -10 \log\{l_e / (2 \pi r_1)\} - 20 \log(\pi r / l_e) - 10 \log(4 / \pi) \\ &= -10 \log\{l_e / (\pi r_1)\} - 20 \log(\pi r / l_e) + 10 \log(\pi / 2) \\ &= -10 \log\{l_e / (\pi r_1)\} - 20 \log(\pi r / l_e) + 2 \end{aligned}$$

半自由空間空間 $Q=2$ のときも同様にして、次式が得られる。

$$L_{p2} - L_{p1} = -10 \log\{l_e / (\pi r_1)\} - 20 \log(\pi r / l_e) - 2$$

- (3) 面音源の場合、 $a/\pi \leq r_1, r_2 \leq b/\pi$ では線音源扱いになるので、 $L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(r_2/r_1)$ になる。
また、 $r_1, r_2 \geq b/\pi$ では点音源扱いになるので、 $L_{p1} - L_{p2} = 20 \log(r_2/r_1)$ になる。

一方、 $r_1 = a/\pi, r_2 < b/\pi$ の場合でも線音源扱いになるので、

$$L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(r_2/r_1) = 10 \log(\pi r_2/a) = 10 \log(r_2/a) + 5$$

また、 $r_1 = a/\pi, r_2 \geq b/\pi$ の場合には、次のようになる(但しサフィックスは距離を表わしている)。

$$(L_p)_{a/\pi} - (L_p)_{b/\pi} = 10 \log(b/a), \quad (L_p)_{b/\pi} - (L_p)_r = 20 \log\{r_2/(b/\pi)\}$$

よって $L_{p1} - L_{p2} = (L_p)_{a/\pi} - (L_p)_{b/\pi} + (L_p)_{b/\pi} - (L_p)_r = 10 \log(b/a) + 20 \log\{r_2/(b/\pi)\}$ が得られる。

なお $r_1 < a/\pi$ では、 $(L_p)_{a/\pi}$ と変化しない筈であるので、条件 $r_1 = a/\pi \rightarrow r_1 \leq a/\pi$ に変更できる。

[補足 5 反射の影響の扱いについて⁽¹⁾⁽⁴⁾

- (1) 受信点に到達する音には、放射によって直線的に空間をよぎってと到達する直接音と、一旦、反射面で反射してから到達する間接音がある。平面反射では、直接音と反射音の夫々の音圧は、

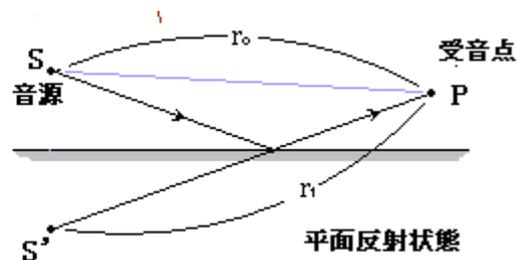
$$\text{直接音: } p = (A/r_0) \exp(i\omega t)$$

$$\text{反射音: } p' = (A R_e / r_1) \exp(i\omega t)$$

ここで A = 音圧振幅、 R_e = 反射係数

r_0, r_1 = 距離(右図)

i = 虚数、 ω = 角周波数、 t = 時間、



音の反射は、上図のように反射面が十分に大きい時、光の反射と同じように考えてよい。反射音では反射係数 R_e は、反射する時の振幅の変化と位相のずれを示している。実際の音は p, p' の合成になる。

以上は単音の場合である。実際はあらゆる周波数の音の集まりであるから、振幅変化や位相のずれあるいは入射方向もランダムになり、音波の直接的な合成は無意味である。むしろ以下のようにオーバーオール的なエネルギー密度で扱うのがよい。

反射面が1枚の場合を考える。点音源ではエネルギー密度は、直接音のとき $E_0 = P/(4 \pi r_0^2 c)$ 、反射

音のとき $E_1 = PR_e / (4\pi r_1^2 c)$ なので

$$E = E_0 + E_1 = (P/c) \{ 1/(4\pi r_0^2) + R_e/(4\pi r_1^2) \}$$

両辺に c を乗じ、 $cE = I$ の関係を用いて $I/P = \{ 1/(4\pi r_0^2) + R_e/(4\pi r_1^2) \}$ 、この式の対数をとると

$$\text{左辺} = 10\log(I/P) = 10\log\{(I/I_0)(I_0/P_0)(P_0/P)\} = L_I - L_w = L_p - L_w$$

$$\text{右辺} = 10\log\{ 1/(4\pi r_0^2) + R_e/(4\pi r_1^2) \} = 10\log\{ 1/r_0^2 + R_e/r_1^2 \} - 11$$

よって次の 1 回反射のときの音圧レベルが得られる。

$$L_p = L_w + 10\log\{ 1/r_0^2 + R_e/r_1^2 \} - 11 \quad \text{-----(a)}$$

この場合、 R_e は反射率を示し $R_e = 1 - \alpha$ で定義される。 α は吸音率であり入射角によって変わるが垂直入射のときの吸音率を用いて簡略化してもよい。また屋外における地面や建物の反射では、 α を零にとり、**完全反射扱い即ち $R_e = 1$** にしてもよい。

- (2) 反射面が多数であれば、単独の反射音の L_p を求め、これと直接音の L_p を合成すればよい。なお反射面が多数あるので、複数回反射のケースもでてくる。しかし現実の反射面は完全鏡面になっておらず、波が散乱し反射面で吸音が起こるので(減衰しやすいので)、高次の反射までは考慮する必要はない。

以上は平面反射の場合の議論である。反射面が曲面の場合は大分、様子が変わってくる。即ち、

凹面の場合：反射音が集中して平面のときより強くなる。

凸面の場合：反射音が発散して平面のときより弱くなる。

しかし通常、これらを厳密に処理する必要はなく、単純化し近似化して処理すればいい。

実際のプラント設備では、反射面は多様で多数存在する。これらを(a)式でいちいちカウントして合成してゆくのは大変である。大きな反射面(例えば地面/建屋壁など)だけを考慮し、後は無視しても構わない。反射音<直接音であるから、むしろ安全側にカウントできる。

- (3) 再び反射面が 1 枚のときを考える。反射音の伝搬距離 r_1 は直接音の伝搬距離 r_0 より長くなるが、仮に $r_0 \doteq r_1$ で、しかも反射面が地面のように固くて吸音率 α が殆ど零に近く反射率 R_e が 1 と見なせるとき、(a)式は次のようになる。

$$L_p = L_w + 10\log\{ 1/r_0^2 + R_e/r_1^2 \} - 11 = L_w + 10\log\{ 2/(4\pi r_0^2) \} = [L_w - 10\log(4\pi r_0^2)] + 10\log 2$$

右辺の [] 内は自由空間すなわち反射面無しの際の SPL である。故に、完全に近い反射面が一枚あれば、受音点の SPL は $10\log 2 = 3\text{dB}$ だけアップして減音量が減ることになる。これは、球面の面積 $[4\pi r_0^2]$ が、半球面の面積 $[2\pi r_0^2]$ に減じることと同じである。ハンドブック [文献(1)] では、

反射面 1 枚の時 $Q=2$ 、反射面 2 枚の時 $Q=4$ 、反射面 3 枚の時 $Q=8$ (但し点音源ケース) となっているが、上記の結果 $[10\log 2]$ を $10\log Q$ とみなせば、 $Q=2$ であるから符合している。

反射面 2 枚、3 枚についてどうなるのか？ 反射面の間の反射が加わるので、 $Q=4$ 、 $Q=8$ は十分なはずけるような気がする。この Q は**指向係数**である。

本文の図 A-2 は、ハンドブックに示される点音源ケースの指向係数 Q を、拡大適用したものである。

[推論的で確かさに欠けるが、一応、現状の認識を示しておく。]

[補足 6 室内音響式の導出⁽³⁾]

以下、文献(3)の記述による。室内に音源がある場合、室内の任意の受音点における伝搬音は、直接音(放散音)と間接音(反射音)からなっている。直接音のレベルは周知の通り、

$$L_p = L_w - 10 \log S = L_w + 10 \log(1/S) = L_w + 10 \log\{Q/(4\pi r^2)\}$$

である。一方、間接音については音響エネルギー密度で扱う。

音源から発生した音の残響期の室内平均のエネルギー密度は、 $E = \{4P/(c\alpha S)\}(1 - e^{-\{c\alpha S/(4V)\}t})$ となる⁽³⁾。この式は、時間経過によりエネルギー密度が定常値 $E_0 = \{4P/(c\alpha S)\}$ へ収束することを示している。

この時間項は、音波のピークが音速 c で t 秒間に $[ct/(4V/S)]$ 回、壁に衝突し、その都度 α だけ吸音されることで生じる減衰を表している。

定常エネルギー密度 E_0 には前述のように直接音と間接音が含まれるが、直接音の音波ピーク 1 回分の平均エネルギー密度は $[E_d = Pt/V = P_x\{4V/(cS)\}/V = 4P/(cS)]$ であるから、間接音の平均エネルギー密度は

$$E_r = E_0 - E_d = 4P/(c\alpha S) - 4P/(cS) = (4P/c)\{(1-\alpha)/(S\alpha)\} = 4P/(cR) \quad [\text{ここで } R = S\alpha/(1-\alpha)]$$

音速 $c = I_r/E_r$ であるから、 $I_r = cE_r = 4P/R$ 。ここで $P = I_r S_r$ であるから、 $S_r = R/4$ になる。 S_r は放射面積相当であるから、 $1/S \rightarrow (1/S + 1/S_r)$ 。従って、室内音響式は次のようになる。

$$L_p = L_w + 10 \log(1/S + 1/S_r) = L_w + 10 \log\{Q/(4\pi r^2) + 4/R\}$$

[補足 7 吸音率の定義と透過率/反射率との関係]

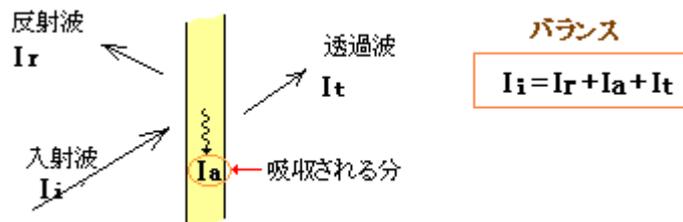
吸音率は「均質に入射した音のエネルギー(I_i)を、表面で反射されるエネルギー(I_r)と物質内で吸収されるエネルギー(I_a)と透過されるエネルギー(I_t)に別けた時、次の式で与えられるエネルギー割合を吸音率 α という。

$$\alpha = (I_i - I_r)/I_i = 1 - (I_r/I_i) = 1 - R_e \quad \text{ここで } R_e = \text{反射率} = (I_r/I_i)$$

また、エネルギーのバランスは下図に示すように、 $I_i = I_r + I_a + I_t$ であるから、

$$\alpha = (I_i - I_r)/I_i = (I_a + I_t)/I_i = (I_a/I_i) + (I_t/I_i) = \beta + \tau \quad \text{ここで } \tau = \text{透過率} = (I_t/I_i)$$

このように吸音率 α と反射率 R_e と透過率 τ には、相関関係がある。ここで注目すべきは、吸音率 α が、材料に吸収され消失するエネルギー(ここでは強さ)の割合 β ではなく、内表面をパスする割合であることである。反射もなく吸収もない完全パスの状態では $\alpha \doteq \tau \doteq 1$ になる。



なお、吸音率は同じ吸音材でも音の入射角によって異なり、垂直入射、斜入射、ランダム入射の3つの吸音率がある。垂直入射と斜入射は特例的で、一般にはランダム入射吸音率(または残響室吸音率)が使われている。本 TS でもランダム入射吸音率をもって吸音率 α とする。

[補足 8 隣接する室の間仕切越しの音の伝搬式の導出]

- (1) 2つの室はどちらも吸音材の内張りのない拡散音場とする。その場合、室平均の過渡的なエネルギー密度は次式で与えられる⁽³⁾。

$$E = 4P / (c \alpha S) [1 - \text{Exp}\{-\{c \alpha S / (4V)\}t\}] \rightarrow \text{定常状態では } E = 4P / (c \alpha S) \quad \text{or} \quad P = c E \alpha S / 4$$

音源側の室の定常エネルギー密度は、

$$E_1 = 4P / (c \alpha_1 S_1) \quad \text{or} \quad P = c E_1 \alpha_1 S_1 / 4 \quad \text{----- (a)}$$

(P = 音響出力、 α_1 = 音源室の吸音率、 S_1 = 音源室の内表面積)

間仕切の内面に表面層を仮定すると、層を通過する室の定常エネルギー E_1 は殆ど反射/吸音されず、そのまま間仕切に入射するので、層通過の音響出力を P_1 おいて(a)式を適用すると、 $\alpha_1 = 1$ であつ $S_1 = S$ あるから、

$$E_1 = 4P_1 / (cS) \rightarrow P_1 = c E_1 S / 4 \quad (\text{但し } S = \text{間仕切の面積})$$

透過率を τ とすれば、 $I_2 / I_1 = (P_2 / S) / (P_1 / S) = (P_2 / P_1) = \tau$ であるから、透過後の出力エネルギー P_2 は、

$$P_2 = \tau P_1 = c E_1 S \tau / 4 = I_1 S \tau / 4 \quad \text{----- (b)}$$

なお 音の強さは[音速 x エネルギー密度]であるから、 $I_1 = c E_1$ としている(以下同じ)。

(b)式の P_2 は受信側の室の音響出力になるので、(a)式と同様に、

$$P_2 = c E_2 \alpha_2 S_2 / 4 = I_2 \alpha_2 S_2 / 4 \quad \text{----- (c)}$$

(b)を(c)に代入し整理すると、 $E_1 / E_2 = \alpha_2 S_2 / (S \tau)$ になる。この対数をとると、

$$\text{左辺} = 10 \log(I_1 / I_2) = 10 \log(I_1 / I_0) - 10 \log(I_2 / I_0) = L_{p1} - L_{p2}$$

$$\text{右辺} = 10 \log(1 / \tau) + 10 \log(\alpha_2 S_2 / S)$$

$$\therefore L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(1 / \tau) + 10 \log(\alpha_2 S_2 / S) = 10 \log(1 / \tau) + 10 \log(A_2 / S)$$

ここで $TL = 10 \log(1 / \tau)$ であるから、

$$L_{p1} - L_{p2} = TL + 10 \log(A_2 / S) \rightarrow L_p = L_{p1} - TL + 10 \log(S / A_2) \rightarrow (4-6) \text{式}$$

また、 $L_{p1} = L_w + 10 \log(4 / A_1)$ であるから、

$$L_{p2} = L_w + 10 \log(4 / A_1) - TL - 10 \log(A_2 / S) = L_w - TL + 10 \log\{4 S / (A_1 A_2)\}$$

$$\rightarrow L_p = L_w - TL + 10 \log\{4 S / (A_1 A_2)\} \rightarrow (4-5) \text{式}$$

間仕切や仕切壁が多種の構造から構成される場合は、多重音の合成と同様に、

$$L_{p2} = 10 \log(\sum I_j / I_0)$$

$$I_j / I_0 = 10^{L_{p2j} / 10} \quad \text{但し} \quad L_{p2j} = L_w - TL_j + 10 \log\{4 S_j / (A_1 A_2)\}$$

であるから、(4-7)式になる。

[補足 9 屋内-屋外における音の伝搬の導出]

- (1) まず①の屋内や防音カバー内にある音源から屋外にある受信点への伝搬式を導く。壁への入射音のエネルギー密度は、 $E_1 = 4P_1 / (cS)$ で、これを变形して $P_1 = c E_1 S / 4$ 、これに透過率 τ を乗じると、

$$\text{壁外側の音響出力} : P_2 = P_1 \tau = c E_1 S \tau / 4 = I_1 S \tau / 4 \quad (\because I_1 = c E_1)$$

が得られる。この P_2 は、 $P_2 = I_2 S = I_2 S_0$ (但し内表面積 $S =$ 外表面積 S_0) で現わされるので、

$$I_1 S_0 \tau / 4 = I_2 S_0 \rightarrow I_1 / I_2 = 4 / \tau$$

この対数をとると、 $10 \log(I_1 / I_2) = \log(4 / \tau) \rightarrow L_{p1} - L_{p2} = 10 \log(1 / \tau) + 10 \log 4 = TL + 10 \log 4$ になる。
この場合、屋内は拡散音場であり $L_{p1} = L_w + 10 \log(4 / A_1)$ であるから、

$$\text{壁外周の SPL : } L_{p2} = L_w - TL + 10 \log(1 / A_1) \text{ -----(a)}$$

受音点は 建屋壁から r の位置にあるが、建屋中心に点音源をおけば、

$$L_{p3} = L_{p2} + 10 \log\{S_0 / (2 \pi r^2)\}$$

ここで L_{p3} は受音点の SPL で、 S_0 は建屋外表面積(≒内表面積)である。この式に(a)式を代入すれば

$$L_{p3} = L_w - TL + 10 \log(1 / A_1) + 10 \log\{S_0 / (2 \pi r^2)\} = L_w - TL + 10 \log(S_0 / A_1) + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$$

$L_{p3} \rightarrow L_p$ 、 $A_1 \rightarrow A$ と標記すれば、次の(4-8a)式が得られる。

$$L_p = L_w - TL + 10 \log(S/A) + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$$

(2) 上記と逆のパターンすなわち、②の屋外に音源があつて屋内に受音点がある場合の伝搬式を導く。

壁外面から音の入射 [$P_1 = c E_1 S_0 / 4$] による壁内側の音響出力 P_2 は、

$$P_2 = P_1 \tau = c E_1 S_0 \tau / 4 = I_1 S_0 \tau / 4$$

P_2 による室内の定常エネルギー密度は $E_2 = 4 P_2 / (c A_2)$ であるから、 $P_2 = c E_2 A_2 / 4 = I_2 A_2 / 4$ 、これを
上式に代入して ($I_1 / I_2 = (A_2 / S_0) (1 / \tau)$)、この対数をとって、

$$10 \log(I_1 / I_2) = 10 \log(A_2 / S_0) + 10 \log(1 / \tau) \rightarrow L_{p2} = L_{p1} - TL + 10 \log(S_0 / A_2)$$

壁外面の SPL は、 $L_{p1} = L_w + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$ であるから

$$L_{p2} = L_w - TL + 10 \log(S_0 / A_2) + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$$

$L_{p2} \rightarrow L_p$ 、 $A \rightarrow A_2$ とすれば、

$$L_p = L_w - TL + 10 \log(S_0 / A) + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$$

となり(1)項の結果と同じになる。ただ、 L_{p1} は音源からの音に対し最大値となっていること、反射が考慮されていないことから、近似的な式になると思われる(実際は複雑な分布になると思う)。

(3) 次に③の離隔した建屋の対向窓越しの伝搬式を導く。この場合、前述の(1)(2)の検討から、

$$\text{音源} \rightarrow \text{音源側建屋壁} \rightarrow \text{受音側建屋前 : } L_{p3} = L_w - TL_1 + 10 \log(S_1 / A_1) + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$$

$$\text{受音側建屋壁} \rightarrow \text{受音点 : } L_{p4} = L_{p3} - TL_2 + 10 \log(S_2 / A_2)$$

L_{p3} 式を L_{p4} 式に代入して、

$$L_{p4} = L_w - (TL_1 + TL_2) + 10 \log(S_1 / A_1) + 10 \log(S_2 / A_2) + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$$

$L_{p4} \rightarrow L_p$ に置き換えて次式を得る。

$$L_p = L_w - (TL_1 + TL_2) + 10 \log\{S_1 S_2 / (A_1 A_2)\} + 10 \log\{1 / (2 \pi r^2)\}$$

[補足 10 : ダクト放出音の PWL 式の導出]

ダクト壁からの透過損失 TL_0 は、区間 le のダクト内の平均 PWL から、区間の平均放出 PWL を差し引いて得られる。

$$TL_0 = L_{wa} - L_{wr} = \{(L_{pi} + L_{po}) / 2 + 10 \log(P \cdot le)\} - (L_{pi} - L_{po}) / 2 = L_{po} + 10 \log(P \cdot le)$$

故に $L_{po} = TL_0 - 10 \log(P \cdot le)$ となる。一方

出口の PWL-SPL 関係は、 $L_{wi} - L_{wr} = L_{po} + 10 \log S$ であるから、これに L_{po} を代入すると、

$$L_{wi} - L_{wr} = TL_0 - 10 \log(P \cdot le) + 10 \log S \rightarrow L_{wr} = L_{wi} - TL_0 + 10 \log(P \cdot le / S)$$

が得られる。

引用文献・テキスト)

- (1) 日本音響材料協会編「騒音・振動対策ハンドブック」(技法堂出版) 1982
- (2) 日本機械学会編「機械騒音ハンドブック」(産業図書) 1991
- (3) 鈴木、西村、雉本、御法川「機械音響工学」(コロナ社)
- (4) 近角、蓮沼ら「音響と振動」(実験物理学講座)(共立出版)
- (5) 「空気調和設備ハンドブック」第8章 防音・防振設計
- (6) 技術資料「ニチアスの騒音防止とその材料」第2編 騒音防止対策
- (7) 「最近の騒音・振動問題の動向」中野 高圧ガス Vol.36 No.12 (1999)
- (8) 中村「騒音測定器と測定法」(土木学会関西支部講習会テキスト)
- (9) 西島製作所「ポンプ便覧」6. 騒音振動対策