

環境アセスメントにおける
定量的予測手法に関するセミナー
(騒音予測編)
第1日

一般財団法人 九州環境管理協会
環境部環境技術課 田中 憲一

第1日の内容

- **【解説】**
騒音予測の基礎
(用語の定義、デシベル演算、伝搬計算式など)
- **【実習】**
ちょっとした平面予測をやってみましょう。
(ASJ CN-Model 2007の要所をかいつまんで)

説明の流れ

1. 音の性質、波の性質など
2. 音波の基礎(平面波理論)
3. レベルとデシベル
4. 物理量と評価量
5. 音の伝搬と距離減衰

先に「まとめ」を示しておきます。

- これだけ覚えていれば何とかなる？

– 半自由音場における距離減衰式

$$L_I = L_W - 8 - 20 \log_{10} r \quad L_I = L_{I1} - 20 \log_{10} (r / r_1)$$

– レベルのエネルギー和とエネルギー平均

$$L_S = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \quad L_e = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right)$$

– 等価騒音レベル

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_A(t)/10} dt \right] = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Ai}/10} \right]$$

– 単発騒音暴露レベルからの等価騒音レベル計算

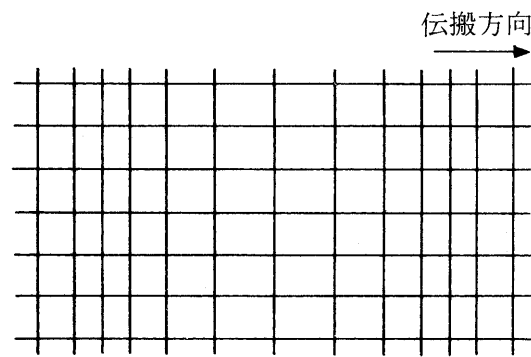
$$L_{AE} = 10 \log_{10} \left[\frac{\Delta t}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Ai}/10} \right] \quad L_{Aeq,T} = L_{AE} + 10 \log_{10} \frac{nT_0}{T}$$

音響(音)とは

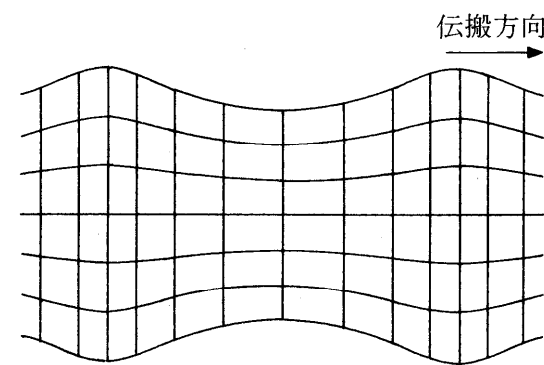
- 音響(音)とは
 - 空気中を伝搬する(気体を媒質とする)音波
- 振動とは
 - 地中・地表面・建物などを伝搬する(固体を媒質とする)音波
- 物理現象としてはいずれも弾性波。
 - 慣性力と内部変位に比例した内部応力が生じることで、変位や内部応力の変化が伝搬する。

弾性波の種類 (1)縦波

- 音波の伝搬方向と媒質粒子の振動方向とが一致する波。
- 疎密波、圧縮波とも呼ばれる。
- 気体中や液体中ではこの縦波しか存在しない。
- 固体中では他のどの弾性波よりも伝搬速度が速い。
 - 地震のP波 (Primary wave) はこの縦波。



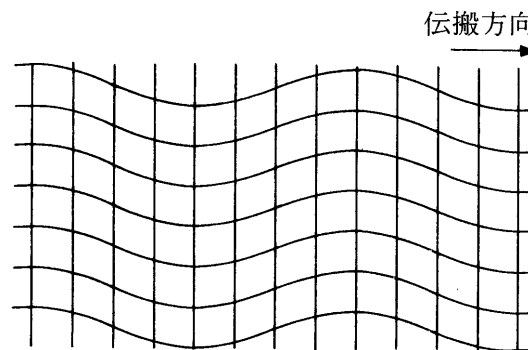
(a) 無限媒質中



(b) 有限媒質中

弾性波の種類 (2)横波

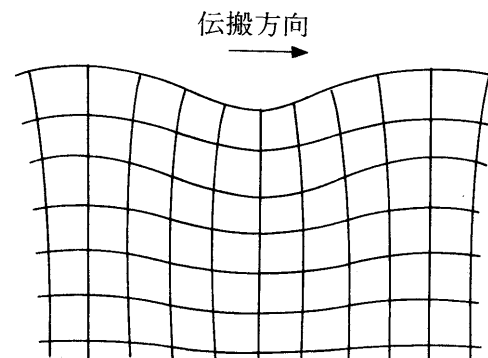
- 音波の伝搬方向と媒質粒子の振動方向とが垂直な波。
- すべり波、せん断波とも呼ばれる。
- 気体中や液体中では、せん断応力が存在しないので横波は伝搬し得ない。
 - ただし液体表面では、重力や表面張力を復元力とする表面波が生じる。
- 伝搬速度は縦波より遅い。
 - 地震のS波 (Secondary wave) はこの横波。



弾性波の種類 (3)その他

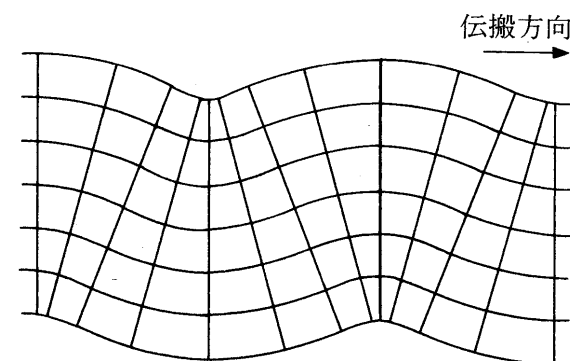
- レイリー波

- 弾性体の自由境界面(表面)に沿って伝搬する表面波



- 屈曲波

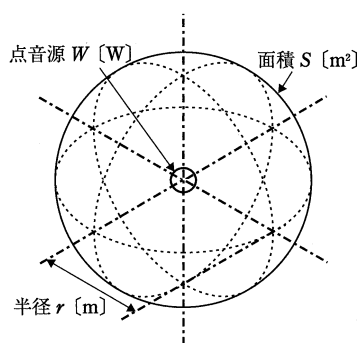
- 鉄板や壁など板状の媒質の折れ曲がりにより伝播する波



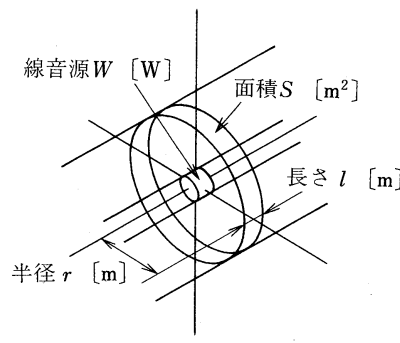
- 弦
- などなど

音の基礎（平面波の理論）

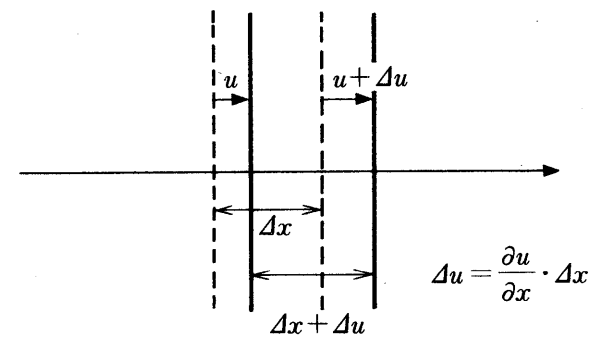
- 音波には、**球面波**、**円筒波**、**平面波**などがある。
- 平面波は理論的解析が容易であり、また有限な大きさの音源（例：点音源）から十分離れた点の音波は局所的には平面波とみなせるので、音波を理解するための基礎となる。



球面波



円筒波

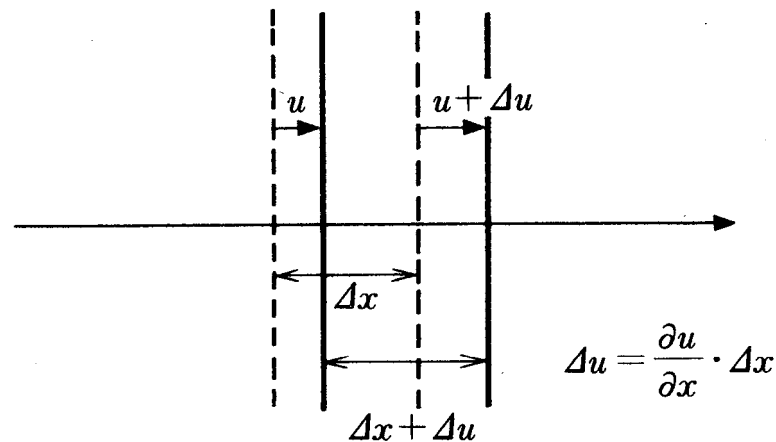


平面波

音圧

- x 軸方向へ伝搬する平面波を考える。
(媒質内の応力や粒子速度は、 y 軸方向や z 軸方向には一様)
- 音波の存在によって、媒質粒子がある瞬間に x 方向に u [m]だけ変位し、その変位が x 軸上で一定ではないとすると、その瞬間に圧力の増加(すなわち音圧 p [Pa])が生じる。
- このとき、変位 u [m]と音圧 p [Pa]の間には、次の関係が成り立つ(K は体積弾性率[Pa])。

$$p = -K \frac{\partial u}{\partial x}$$

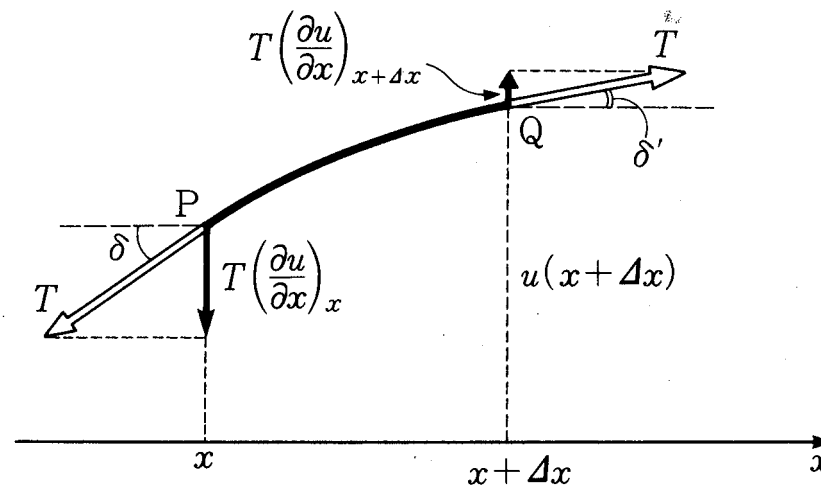


波動方程式

- また、 x 軸上で瞬時音圧に差があるとすれば、粒子はその圧力差により力を受けて加速度が生じる(ρ は空気の密度 [kg/m³]、 c は波速[m/s])。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \therefore \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

- これは**波動方程式**といわれ、 $c = \sqrt{K / \rho}$ なる速度で音圧の変化が伝搬することを示している。



特性インピーダンス

- ただ一つの平面波が存在する状況では、**音圧** p [Pa]と**粒子速度** v [m/s]の比は、媒質ごとに定まる一定値となる。

$$\frac{p}{v} = \sqrt{\rho K} = \rho c \quad \text{ただし} \quad v = \frac{\partial u}{\partial t}$$

- これを**特性インピーダンス**といい、空気は0°C、1気圧で428 Pa·s/m である。
- 通常は400 Pa·s/m として扱われることが多い。

音の強さ

- 音波によって媒質中に圧力が生じ、媒質粒子が変位するということは、音波が粒子にあるエネルギーを与え、それが順次伝搬されていることとなる。
- 断面積 $S[\text{m}^2]$ を垂直に通過する平面波を考えると、その音圧 $p[\text{Pa}]$ によって断面にはたらく力 $f[\text{N}]$ は $f = pS$ であり、それによって断面上の粒子が $u[\text{m}]$ だけ変位したとすれば、その間に断面を通過したエネルギー $e[\text{J}]$ は $e = fu = pSu$ となる。
- **単位面積を毎秒通過する音のエネルギー** (= 音響パワー [単位時間あたりの音のエネルギー] の密度) を **音の強さ** といい、音の強さを $i [\text{W}/\text{m}^2]$ とすれば音圧 $p[\text{Pa}]$ とは次式の関係にある (ここで v は粒子速度 $[\text{m}/\text{s}]$ 、 ρ は空気密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 c は音速 $[\text{m}/\text{s}]$)。

$$i = \frac{1}{S} \frac{\partial e}{\partial t} = p \frac{\partial u}{\partial t} = pv = \frac{p^2}{\rho c}$$

実効値

- 波によるエネルギーの伝搬を考えると、瞬時値（時々刻々と強さが変わる）では何かと具合が悪い。
- このため、**1周期間のエネルギー平均値（実効値**と呼ばれる）が用いられるのが一般的である。

$$I = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\{p(t)\}^2}{\rho c} dt$$

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \{p(t)\}^2 dt} \quad I = \frac{P}{\rho c}$$

レベル

- 騒音の測定や評価では、音圧 P [Pa]や音の強さ I [W/m²]など、意味の異なる物理量がすべてレベル（基準値との比の対数）で表現される。
 - ウェーバー・フェヒナーの法則
感覚量 E と刺激量 R は $E=k\log R$ の対数関係にある。
 - 最小可聴値の音圧： 10^{-5} [Pa]オーダー
痛覚域値の音圧： 10^2 [Pa]オーダー
7桁も変動する物理量をそのまま使うのは不便。

デシベル

- レベルの単位として「デシベル」(dB)が用いられる。
- 定義は、エネルギーの大きさ X_1 と X_2 の比の常用対数(単位:ベル)の1/10(接頭辞:デシ)

$$10 \log_{10} \frac{X_1}{X_2}$$

- ある基準値 X_0 との比をデシベル表示した数値 L は間接的に、あるエネルギー量 X の大きさを表すことになる。

$$m = \log_a M \iff a^m = M$$

$$L = 10 \log_{10} \frac{X_1}{X_0} \quad X = X_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$$

様々な「レベル」(1)

- 音の強さのレベル L_I [dB]

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

$I_0 = 10^{-12} [\text{W}/\text{m}^2] = 1 [\text{pW}/\text{m}^2]$: 基準の音の強さ
(1kHzの純音に対して人の聴覚が感じ得る最小の音の強さ)

様々な「レベル」(2)

- 音圧レベル L_P [dB]

$$\log_a M^p = p \log_a M$$

$$L_P = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0}$$

$P_0 = 20 \times 10^{-6}$ [Pa]=20[μ Pa]: 基準音圧
(1kHzの純音に対して人の聴覚が感じ得る最小の音圧)

- 基準値 P_0 は、平面波において $\rho c = 400$ [Pa·s/m]のとき、音圧レベル L_P と音の強さのレベル L_I が数値的に一致するように選ばれている。

様々な「レベル」(3)

- 音源の音響パワーレベル L_W [dB]

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0}$$

W [W]: 音源の音響パワー

$W_0 = 10^{-12}$ [W] = 1 [pW]: 基準音響パワー

- ある音源から放射される音響エネルギーの全てが 1m^2 の面積を垂直に一様に通過するとき、音源の音響パワーレベルとその面における音の強さのレベルとは数値的に一致する。

レベル差

- エネルギーに比例する物理量 X について、2つの量 X_1, X_2 が、ともに X_0 を基準値としてレベル表示されたものを L_{x1}, L_{x2} [dB]とする。

$$L_{x1} = 10 \log_{10} (X_1 / X_0) \quad L_{x2} = 10 \log_{10} (X_2 / X_0)$$

- その差 D_x [dB]は、

$$D_x = L_{x1} - L_{x2} = 10 \log_{10} (X_1 / X_0) - 10 \log_{10} (X_2 / X_0)$$

$$= 10 \log_{10} \left(\frac{X_1 / X_0}{X_2 / X_0} \right) = 10 \log_{10} (X_1 / X_2)$$

となり、2つの量の比のレベルを表す。

- 2つの量の比は

$$X_1 / X_2 = 10^{D_x/10}$$

$$\log_a \frac{M}{N} = \log_a M - \log_a N$$

$$m = \log_a M \iff a^m = M$$

レベル差とエネルギー比

レベル差[dB]	エネルギー比	レベル差[dB]	エネルギー比
60	10^6	6	4
40	10^4	5	3.16
30	10^3	3	2
20	10^2	0	1
14	25	-6	1/4
10	10	-20	$1/10^2$
7	5	-40	$1/10^4$

たとえば、レベル差が3dBなら、エネルギー比は2倍。
→83dBの音のエネルギーは80dBの音のエネルギーの2倍。
103dBの音のエネルギーは100dBの音のエネルギーの2倍。
エネルギー比は「レベル比」ではなく「レベル差」で決まる。

レベルの合成(1) エネルギー和

- レベル表示されている2つの量を加えたもののレベルは、レベル表示のままでは求めることができず、一度、物理量そのものに戻して加算し、再びレベル表示に変換しなければならない。
この計算は「エネルギー和」「パワー和」「エネルギー合成」などと呼ばれている。
- エネルギーに比例する物理量 X について、2つの量 X_1, X_2 のエネルギー和を X_S とし、それらのレベル表示を L_{x1}, L_{x2}, L_{xS} [dB]とすると、

$$X_S = X_1 + X_2$$

であり、これをレベルで表示すると

$$\begin{aligned} L_{xS} &= 10 \log_{10} (X_S / X_0) = 10 \log_{10} \left(\frac{X_1 + X_2}{X_0} \right) \\ &= 10 \log_{10} \frac{X_0 \cdot 10^{L_{x1}/10} + X_0 \cdot 10^{L_{x2}/10}}{X_0} = 10 \log_{10} (10^{L_{x1}/10} + 10^{L_{x2}/10}) \end{aligned}$$

- 同様に、 n 個のレベルのエネルギー和 L_S [dB]は、

$$L_S = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10}$$

$$m = \log_a M \iff a^m = M$$

レベルの合成(2) エネルギー平均

- エネルギー和と同様に、 N 個のレベル L_i [dB] ($i=1, 2, \dots, N$) のエネルギー平均 L_e [dB]は、次式で計算される(「パワー平均」とも呼ばれる)。

$$L_e = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right) = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} - 10 \log_{10} N$$

- なお、平均される値 L_i [dB] ($i=1, 2, \dots, N$) の最大値と最小値の差が5dB以内の場合には、レベルの算術平均値

$$L_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i$$

で近似することもできる(エネルギー平均値との差は0.7dB以内)。

物理量、感覚量、評価量

- **物理量**
明確な定義に基づき普遍的に定まる量
 - 音圧レベル、音の強さのレベル、等
- **感覚量**
同じ物理量に対する人の感覚の違いを尺度化したもの
 - 音の大きさのレベル、音のうるささのレベル、等
- **評価量**
人の感覚量との対応が優れ、簡単な測定器で測定可能な客観量
 - 騒音レベル(A特性音圧レベル)、WECPNL、等

様々な評価量(1)

$$\log_a M^p = p \log_a M$$

- 騒音レベル(A特性音圧レベル)
周波数による人間の感覚量の違いに基づき、A特性の重み付けが施された音圧レベル

$$L_A = 10 \log_{10} \left(\frac{P_A}{P_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{P_A}{P_0}$$

L_A [dB]: 騒音レベル(A特性音圧レベル)

P_A [Pa]: A特性の周波数補正が施された音圧

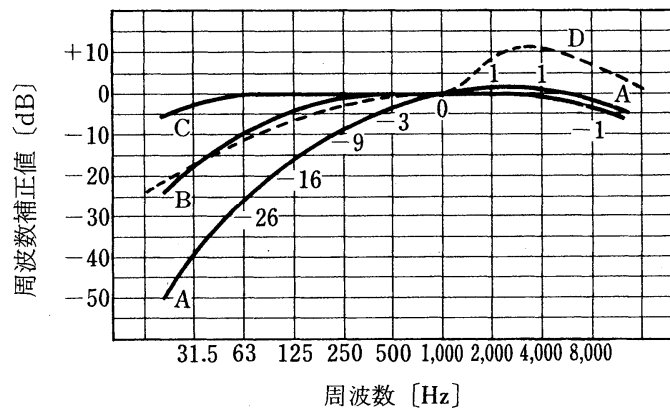
- 前出の「音響パワーレベル」についても、同様にA特性周波数補正が施されたものを「A特性音響パワーレベル」と呼ぶ。

$$L_{WA} = 10 \log_{10} \frac{W_A}{W_0}$$

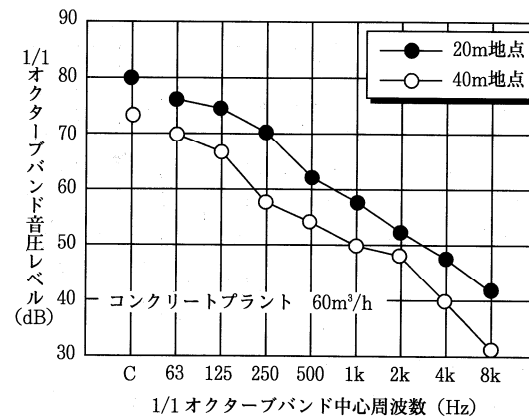
A特性の周波数補正

- 周波数分析されたバンド音圧レベル L_{Pi} [dB]に、周波数帯ごとのA特性周波数補正值 C_{Ai} [dB]を加えた上で、全周波数帯の音圧レベルをエネルギー合成することで計算される。

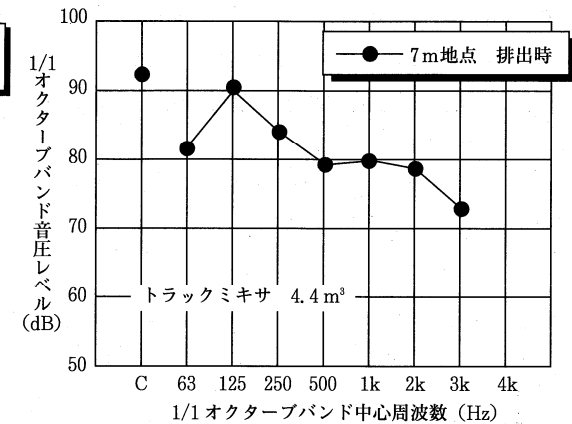
$$L_A = 10 \log_{10} \sum_i 10^{(L_{Pi} + C_{Ai})/10}$$



周波数補正值

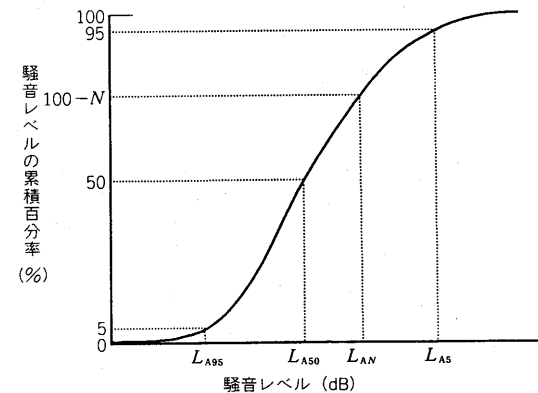
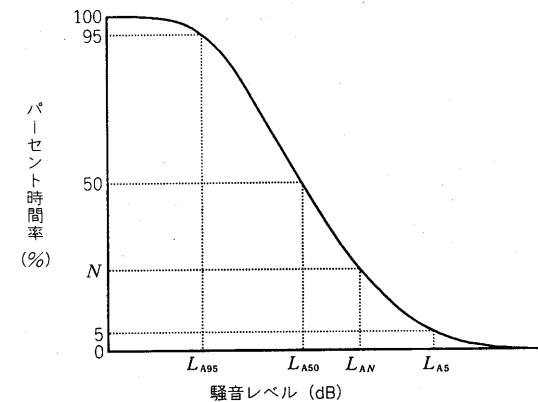


バンド音圧レベルの測定例

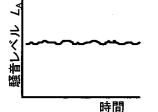
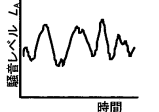
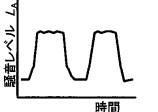

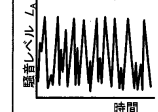


様々な評価量(2)

- 時間率騒音レベル L_{Ax}
時刻とともに不規則に変動する騒音レベルが、あるレベル以上である時間が実測時間の $x\%$ を占める場合、それを $x\%$ 時間率騒音レベルと呼ぶ。
- よく使われるもの
 - L_{A5} : 5%時間率騒音レベル
(「90パーセントレンジの上端値」とも呼ばれる。)
 - L_{A50} : 50%時間率騒音レベル
(中央値)



騒音の種類と表示方法

種類	定常騒音	非定常騒音			
		変動騒音	間欠騒音	衝撃騒音	
				分離衝撃騒音	準定常衝撃騒音
JIS Z 8731 における表現	レベル変化が小さく、ほぼ一定とみなされる騒音	レベルが不規則かつ連続的にかなりの範囲にわたって変化する騒音	間欠的に発生し、一回の継続時間が数秒以上の騒音	個々に分離できる衝撃騒音 (衝撃騒音：継続時間が極めて短い騒音)	レベルがほぼ一定で極めて短い間隔で連続的に発生する衝撃騒音
時間変動特性の例					
騒音源の例	発動発電機	トラクションベル* バックホウ* アースオーガ* アースドリル	移動式クレーン（吊り上げ作業）	ディーゼルハイルハンマ* 油圧ハイルハンマ* インパクトレンチ	ブレーカ*
騒音規制法に基づく表現	騒音計の指示値が変化せず、又は変動が少ない場合	騒音計の指示値が不規則かつ大幅に変動する場合	騒音計の指示値が周期的又は間欠的に変動し、 ①その指示値の最大値が概ね一定の場合 ②その指示値の最大値が一定でない場合	騒音計の指示値が周期的又は間欠的に変動し、 ①その指示値の最大値がおおむね一定の場合 ②その指示値の最大値が一定でない場合	騒音計の指示値が周期的又は間欠的に変動し、その指示値の最大値が概ね一定の場合
騒音評価量	騒音計の指示値又はその平均値	測定値の90%レンジの上端の数値	①変動ごとの指示値の最大値の平均値 ②変動ごとの指示値の最大値の90%レンジの上端の数値	①変動ごとの指示値の最大値の平均値 ②変動ごとの指示値の最大値の90%レンジの上端の数値	変動ごとの指示値の最大値の平均値
記号	L_A	L_{A5}	① $L_{A,Fmax}$ ② $L_{A,Fmax,5}$	① $L_{A,Fmax}$ ② $L_{A,Fmax,5}$	$L_{A,Fmax}$

注) 表中の*は、騒音規制法に規定する特定建設作業で使用される建設機械である。

様々な評価量(3)

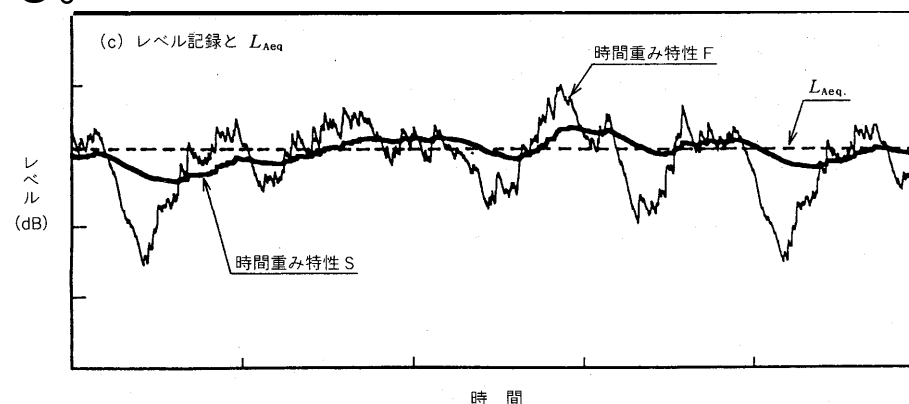
- 騒音レベルの最大値 $L_{A,Fmax}$
衝撃音や間欠音など、時間軸上で分離可能な単一の騒音の評価に用いられる、指示値の最大値。
測定においては速い動特性 (FAST) が用いられる。

動特性(時間重み特性)とは

- (時間で平均化された)指針の動きの特性。
- 短時間で大きく変動する測定値を時間で平均化するにあたり、人の感覚との対応の良さや、測定器の回路への実装性の良さから、時刻の経過とともに重み付けが小さくなる次式を用いて時間平均が施される。

$$Y^2(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} y^2(t-t_1) e^{-t_1/\tau} dt_1$$

- τ [s]は時間の次元を持つことから時定数と呼ばれ、大きくとるほど平均化時間は長くなる。
- 騒音計では、時間重み特性F(FAST、時定数125ms)とS(SLOW、時定数1s)の2種類がある。



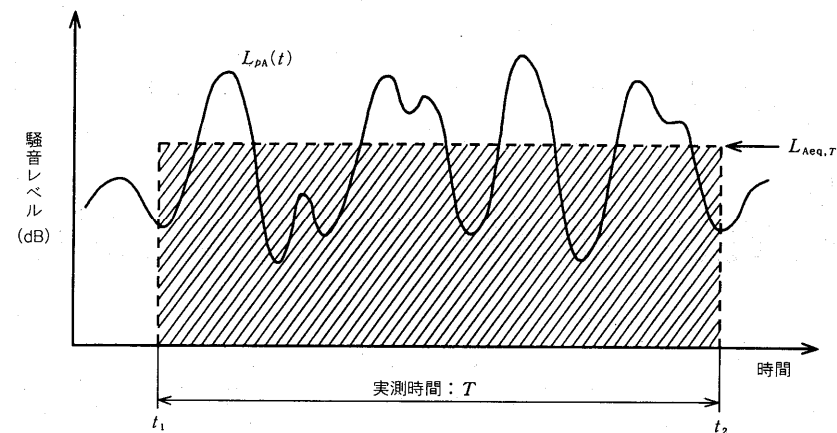
様々な評価量(4)

- 等価騒音レベル
ある時間範囲 $T[s]$ の中で変動する騒音の騒音レベルを、エネルギー的な平均値として表した量。
ある時間範囲 $T[s]$ における等価騒音レベルは、その騒音と等しいA特性の平均2乗音圧をもつ定常音の騒音レベルに相当する。

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right]$$

- 時間によって変化する騒音レベルを $L_A(t)[dB]$ とすると、

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_A(t)/10} dt \right]$$



- 時間 $T[s]$ 内で等時間間隔に N 個測定した騒音レベル $L_{Ai}[dB]$ ($i=1, 2, \dots, N$)からは、

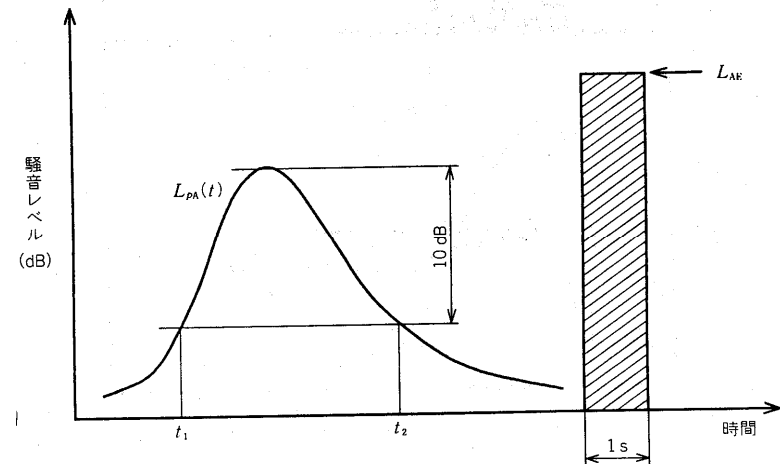
$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Ai}/10} \right]$$

様々な評価量(5)

- 単発騒音暴露レベル
単発的に発生する騒音の全エネルギーと
等しいエネルギーをもつ、
継続時間1秒の定常音の騒音レベル。

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right]$$

T_0 [s]: 基準時間 (=1s)



- 騒音の継続時間内で、 Δt [s] 間隔に N 個測定した騒音レベル L_{Ai} [dB] ($i=1, 2, \dots, N$) からは、

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \left[\frac{\Delta t}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Ai}/10} \right]$$

- 単発騒音暴露レベル L_{AE} [dB] の騒音が、時間 T [s] 内に n 回発生した場合の
等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ [dB] は、

$$L_{Aeq,T} = L_{AE} + 10 \log_{10} \frac{nT_0}{T} = L_{AE} + 10 \log_{10} n - 10 \log_{10} \frac{T}{T_0}$$

様々な評価量(6)

- 時間帯補正等価騒音レベル
1日を昼間(7-19時)、夕方(19-22時)、夜間(22-翌7時)の時間帯に区分し、それぞれの時間帯で0, 5, 10dBの重みを加えた1日間の等価騒音レベル。

$$L_{den} = 10 \log_{10} \frac{1}{24} \left[\int_0^7 10^{\{L_A(t)+10\}/10} dt + \int_7^{19} 10^{L_A(t)/10} dt \right. \\ \left. + \int_{19}^{22} 10^{\{L_A(t)+5\}/10} dt + \int_{22}^{24} 10^{\{L_A(t)+10\}/10} dt \right]$$

その他、よく使われる用語

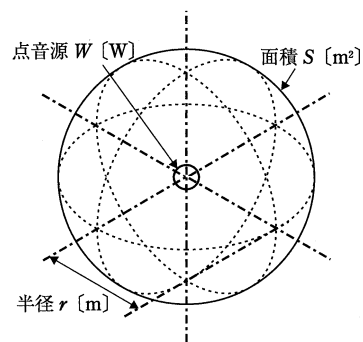
- **総合騒音**
 - ある場所における、ある時刻の総合的な騒音。
- **特定騒音**
 - 総合騒音の中で音響的に明確に識別できる騒音。
- **残留騒音**
 - 総合騒音のうち、すべての特定騒音を除いた残りの騒音。
- **暗騒音**
 - ある特定の騒音に着目したとき、それ以外のすべての騒音。

音の伝搬

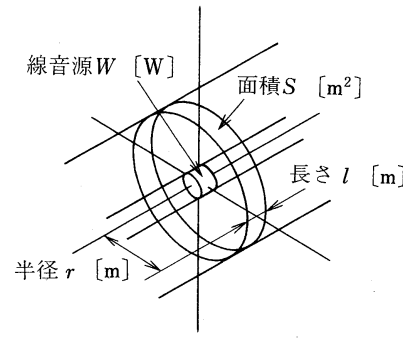
- 音は波動なので、その伝搬を厳密に論じるには位相を考慮しなければならない。
例) 同一周波数の波が複数あると、山と山が重なれば強め合い、山と谷が重なれば弱め合う。
- しかし、ある特殊な場合を除き、音波の波動性を無視してエネルギーの伝搬だけを考えても支障はなく、そうすると取り扱いは容易になる。

距離減衰

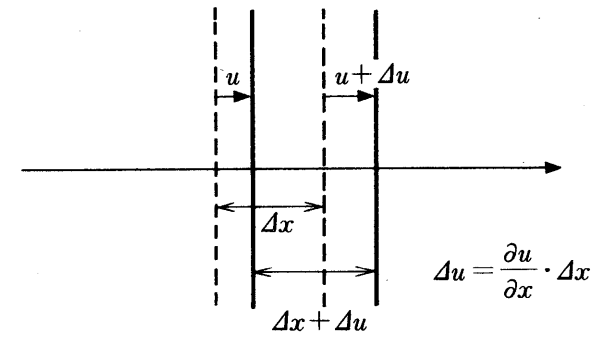
- 球面波や円筒波では、音源から離れるにつれて、音波の通過可能断面積が大きくなるため、音の強さは小さくなる。これを距離減衰という。
- 平面波の強さは、伝搬方向の遠方においても変わらない(距離減衰はない)。



球面波



円筒波



平面波

距離減衰の計算式 まとめ

(1)点音源

- 自由音場

- 音源の音響パワーレベルが既知の場合

$$L_I = L_W - 11 - 20 \log_{10} r$$

- ある距離での音の強さのレベルが既知の場合

$$L_I = L_{I1} - 20 \log_{10} (r / r_1)$$

- 半自由音場

- 音源の音響パワーレベルが既知の場合

$$L_I = L_W - 8 - 20 \log_{10} r$$

- ある距離での音の強さのレベルが既知の場合

$$L_I = L_{I1} - 20 \log_{10} (r / r_1)$$

距離減衰の計算式 まとめ

(2)無限長線音源

- 自由音場

- 音源の音響パワーレベルが既知の場合

$$L_I = L_W - 8 - 10 \log_{10} r$$

- ある距離での音の強さのレベルが既知の場合

$$L_I = L_{I1} - 10 \log_{10} (r / r_1)$$

- 半自由音場

- 音源の音響パワーレベルが既知の場合

$$L_I = L_W - 5 - 10 \log_{10} r$$

- ある距離での音の強さのレベルが既知の場合

$$L_I = L_{I1} - 10 \log_{10} (r / r_1)$$

【考察】距離減衰式の示す意味

音源の種類	音場の種類	音響パワーレベル L_W [dB]が既知の場合	ある距離 r_1 [m]での音の強さのレベル L_{I1} [dB]が既知の場合
点音源	自由音場	$L_I = L_W - 11 - 20 \log_{10} r$	$L_I = L_{I1} - 20 \log_{10} (r / r_1)$
	半自由音場	$L_I = L_W - 8 - 20 \log_{10} r$	$L_I = L_{I1} - 20 \log_{10} (r / r_1)$
無限長線音源	自由音場	$L_I = L_W - 8 - 10 \log_{10} r$	$L_I = L_{I1} - 10 \log_{10} (r / r_1)$
	半自由音場	$L_I = L_W - 5 - 10 \log_{10} r$	$L_I = L_{I1} - 10 \log_{10} (r / r_1)$

- ・音の強さは**通過面積に反比例**する。
- ・11は $10 \log_{10}(4\pi)$ 、8は $10 \log_{10}(2\pi)$ 、5は $10 \log_{10}\pi$ のこと。
- ・**プラス符号は掛け算を、マイナス符号は割り算を表す。**
- ・ $10 \log_{10} r$ は「距離の1乗」、 $20 \log_{10} r$ は「距離の2乗」を表す。

$$\log_a MN = \log_a M + \log_a N$$

$$\log_a \frac{M}{N} = \log_a M - \log_a N$$

$$\log_a M^p = p \log_a M$$

最低限覚えておきたい距離減衰式

- 自由空間での音の伝搬を計算する機会は、おそらくあまりない。
- 一様な無限長線音源なるものも、普通は無い。線音源を取り扱う場合はあっても、有限長であったり直線状でなかったりするのが普通なので、線音源を微小長さで分割し、その中央に離散点音源を配置するという取り扱いがほとんどである。
- したがって、半自由音場の点音源に関する以下の式を覚えていれば、アセスにおけるほとんどの騒音予測には対応できる。

– 音源の音響パワーレベルが既知の場合

$$L_I = L_W - 8 - 20 \log_{10} r$$

– ある距離での音の強さのレベルが既知の場合

$$L_I = L_{I1} - 20 \log_{10} (r / r_1)$$