

2 物理音響学の基礎

2.1 音波

音波は、物質に加わる外力が物質内部を慣性と弾性による振動として伝わる波動である。空気中では、物体の振動などの外力が加わると、図2-1のように空気の微小部分（空気粒子という）が運動して大気圧が変化し、隣接する空気粒子が次々に振動して音波が伝わる。この空気粒子の往復振動は、波の進行方向と同一であり、音波は疎密波（縦波）である。粒子の振動変位を粒子変位 y 、その振動速度を粒子速度 $u = dy/dt$ という。音圧 p [Pa] は、音波による大気圧の微小な変動成分である。

音波が伝搬する物質を媒質、音波が存在する空間を音場という。

空気中の音速 c は、

$$c = 331.5 \sqrt{1 + \left(\frac{t}{273}\right)} \approx 331.5 + 0.61t \text{ [m/s]} \quad (2.1)$$

ただし、 t : 温度 [°C]

であり、常温では約 340 m/s である。木材、コンクリート、鉄などの固体中の音速は、空気中に比べてはるかに高く、3,000～5,000 m/s 程度である。

表2-1に、音波に関する基礎的な物理量をまとめて示す（図2-1）。

2.2 音波の記述

(1) 平面波の伝搬

十分に広く、均質な空間（自由音

表2-1 基礎的な物理量

物理量	記号・単位	関係
音速	c [m/s]	
周波数	f [Hz]	
周期	T [s]	$T = 1/f$
波長	λ [m]	$\lambda = c/f$
角周波数	ω [rad/s]	$\omega = 2\pi f$
波長定数	k [rad/m]	$k = 2\pi/\lambda$ $= \omega/c$

場という)を伝搬する平面波の音圧 p は、時間 t と場所 x の関数として次式で表される。

$$p(t, x) = A \cos(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

この式は、時間と場所によって変化する音波の音圧を記述する最も基本的な式であり、場所を固定 ($x=0$) してみると、音圧の時間変化を示し、時間を固定 ($t=0$) してみると音圧の空間分布を表すことが分かる。

(2) 実効値

音圧は大気圧の変動成分であり、電気の交流と同じように時間平均値は零である。そこで音圧の大きさを表す量として、次式に示す実効値 (Root Mean square Value) が用いられる。

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \text{ [Pa]} \quad (2.3)$$

音圧が正弦的に変化する純音の実効値 p は最大振幅 A の 0.707 倍 ($p = A/\sqrt{2}$) である。

(3) 音響インピーダンス

音圧 p と粒子速度 u との比を音響インピーダンス Z という。

$$Z = \frac{p}{u} \quad (2.4)$$

音圧が粒子に作用し、その効果として粒子が速度 u で振動すると考えた場合、インピーダンスは作用と効果の比である。空気や水などの媒質固有の音響インピーダンスを特性インピーダンスという。空気

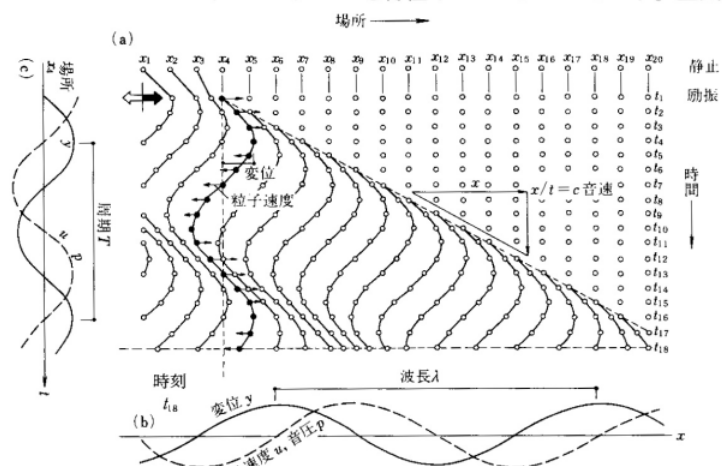


図2-1 音波の伝搬¹⁾ (空気粒子の振動と基礎的物質量)

の特性インピーダンス Z_0 は、次式のように、密度 ρ_0 と音速 c の積で与えられる。

$$Z_0 = \rho_0 c \quad (2.5)$$

また、音響インピーダンスを次式のように空気
の特性インピーダンスで基準化したものは、音響イン
ピーダンス比と呼ばれ、材料表面の音響的性質を表
す場合などに用いられる。

$$z = \frac{Z}{\rho_0 c} \quad (2.6)$$

一般に、この z は重くて硬い材料ほど大きい。

2.3 音波のエネルギー的取扱い

(1) 音の強さ

音の伝搬方向に対して垂直な単位断面を単位時間
に通過する音のエネルギーを音の強さ I [W/m²]
という。この音の強さについては、一般の音場で、

$$I = p \cdot u \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.7)$$

の関係が成り立つことが知られている。

この関係に式(2.4)、(2.5)を代入すると

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} = \rho_0 c u^2 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.8)$$

となる。音の強さは、音圧の2乗に比例することが
分かる。

(2) 音響エネルギー密度

音場の単位体積に含まれる音のエネルギーを音響
エネルギー密度 E [J/m³] という。音の強さ I の
平面波音場では、

$$E = \frac{I}{c} = \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \quad [\text{J/m}^3] \quad (2.9)$$

の関係がある。

2.4 レベル表示

音響の分野では、種々の物理量をレベルで表示す
ることが一般的である。これは、次式のように、あ
る物理量の値 A と基準値 A_0 との比をとり、その常

用対数を10倍した値である。単位は [dB] と書
き、デシベルと読む。

$$L = 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.10)$$

なお、物理量に戻すには

$$A = 10^{L/10} \times A_0 \quad (2.11)$$

とすればよい。

広く用いられている

①音の強さのレベル： L_I

②音響エネルギー密度レベル： L_E

③音圧レベル： L_p

の定義式を表2-2にまとめて示す。

これらのレベルの基準値は式(2.9)の関係に基
づいて決められているため、一般の音場では $L_I =$
 $L_E = L_p$ とみなせる。

(1) 音響パワーレベル

音源が1秒間に放射する音のエネルギーを音響出
力あるいは音響パワー W [W] という。これを、
表2-2のように、レベルで表示したものが音響パ
ワーレベル L_w [dB] である。

(2) レベルの合成、平均

L_1 [dB] と L_2 [dB] の音が同時に存在すると
きのレベル L [dB] は、それぞれのエネルギー密
度を E_1 , E_2 とするとその和が E になるとして、次
式で計算される。

$$\begin{aligned} L &= 10 \log \left(\frac{E}{E_0} \right) = 10 \log \left(\frac{E_1 + E_2}{E_0} \right) \\ &= 10 \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

これをレベルの合成という。

一般に、 N 個のレベルの合成は、

$$L_n = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.13)$$

で求まる。また、 N 個のレベルの平均は、

$$L_n = 10 \log \left\{ \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) / n \right\} \quad [\text{dB}] \quad (2.14)$$

で求められる。この平均は、レベル値の単純な算術
平均と区別して、エネルギー平均と呼ばれる。

表2-2 レベル表示量

名 称	定 義 式	基 準 値
音の強さのレベル	$L_I = 10 \log (I/I_0)$	$I_0 = 10^{-12} \text{ [W/m}^2\text{]}$
音響エネルギー密度レベル	$L_E = 10 \log (E/E_0)$	$E_0 = I_0/c = 2.94 \times 10^{-15} \text{ [J/m}^3\text{]}$
音圧レベル	$L_p = 10 \log (p^2/p_0^2)$ $= 20 \log (p/p_0)$	$p_0 = (\rho_0 c \cdot I_0)^{1/2} = 2 \times 10^{-5} \text{ [Pa]}$
音響パワーレベル	$L_w = 10 \log (W/W_0)$	$W_0 = 10^{-12} \text{ [W]}$

1) 日本建築学会編：建築の音環境設計(設計
計画パンフレット4)、彰国社、1983

9 騒音の計測と評価

9.1 騒音計

音圧レベルや騒音レベルは騒音計 (sound level meter) を用いて測定される。騒音計の例を図9-1に示す。騒音計は、無指向性マイクロホンに入射した音圧に応じて発生する電気信号を周波数補正した後、実効値を dB 表示する機器である。周波数補正しない場合、騒音計は音圧レベル (sound pressure level) L_p [dB] を指示し、周波数重み特性 A (図9-2) を用いると騒音レベル (A-weighted sound pressure level) L_{pA} [dB(A)] を指示する。一般の騒音では、騒音計の時間重み特性は F を用いる。

騒音を測定する際には、反射音の影響を避けるため、地面や壁面などの反射面から少なくとも 1m 以上離して騒音計を設置する必要がある。また屋外など風の影響を受けやすい場所では、マイクロホンに図9-3のような防風スクリーンを装着する。

上記のように、音圧レベル [dB] と騒音レベル [dB(A)] は物理的に異なる量であるが、JIS や環境基準などでは騒音レベルの単位を dB と記述することがあるので注意を要する。

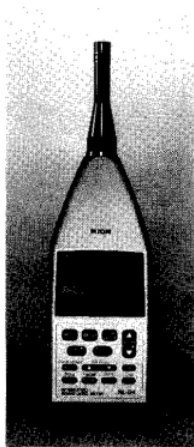


図 9-1 騒音計

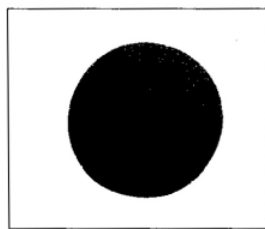


図 9-3 防風スクリーン

(写真提供：リオン株式会社)

9.2 SN 比

騒音計の指示値は、マイクロホンの位置における総合的な音圧レベル (または騒音レベル) であるので、測定対象だけの音のレベルを測定するには、測定対象以外の音 (暗騒音, background noise) の影響がないよう注意しなければならない。

測定対象音のレベル (S dB) と暗騒音レベル (N dB) の差 ($S-N$) dB を SN 比 (signal to noise ratio) という。SN 比が 10 dB 以上あれば、暗騒音を含んだ測定値でも対象音だけのレベルと考えてよいが、SN 比が 10 dB 以下の場合には対象音だけの騒音レベルが測定されないので注意を要する。

9.3 騒音レベルの測定方法

通常の音は時間とともに変化しているため、騒音レベルの測定に際しては変動する騒音レベルのどのような値を測定値とするかを取り決めておく必要がある。

環境騒音 (一般の生活環境及び作業環境に存在する騒音) の騒音レベルは、JIS Z 8731 に、等価騒音レベル $L_{Aeq,T}$ (equivalent continuous A-weighted sound pressure level) で測定すると定められている。

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad (9.1)$$

ここで、 T は時刻 t_1 から t_2 までの時間、 $p_A(t)$ は対

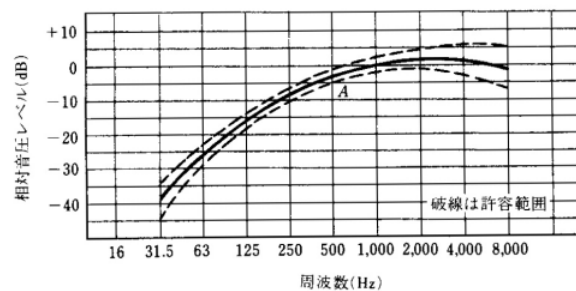


図 9-2 騒音計の A 特性 (JIS C 1502)

象とする音の瞬時A特性音圧、 p_0 は基準音圧(20 μ Pa)である。等価騒音レベルは、変動する騒音の騒音レベルをエネルギー的に平均値(V-2参照)として表した量である。

$L_{Aeq,T}$ は、変動する騒音レベルを、時刻 t_1 から t_2 まで、一定時間間隔でサンプルした値 $L_{pA,i}$ ($i=1, 2, \dots, N$) から、

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{pA,i}/10} \quad (9.2)$$

として求めることもできる。

また、単発的に発生する騒音は単発騒音暴露レベル L_{AE} で測定する。

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad (9.3)$$

ここで、時刻 t_1 から t_2 は対象とする騒音の継続時間、 $p_A(t)$ は対象とする騒音の瞬時A特性音圧、 p_0 は基準音圧(20 μ Pa)、 T_0 は基準時間(1s)である。単発騒音暴露レベルは、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である。

9.4 レベルレコーダ

騒音レベルの変動が激しく、騒音計から直接騒音レベルを読みとることができないような場合には、レベルレコーダ(図9-4)を用いて騒音レベルを記録し、測定後に読み取ってもよい。

9.5 周波数分析

騒音の影響を把握して騒音対策を講じるためには、騒音の周波数の構成を把握する必要がある。建

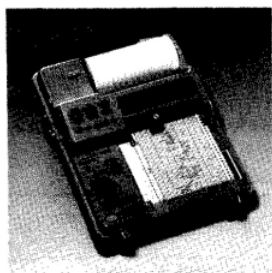


図9-4 レベルレコーダ
(写真提供：リオン株式会社)

築音響の分野では、周波数を比が一定となるように帯域分割して、各帯域ごとの音圧レベルを求める(定比バンド幅の周波数分析)ことが多い。すなわち、騒音計のマイクロホンの出力信号を周波数($f_1 \sim f_2$) Hz だけを通過する帯域フィルタに通し、帯域ごとの音圧レベルを求める。帯域幅としては、一般に1または1/3オクターブが用いられる。 $\sqrt{f_1 f_2}$ を中心周波数(center frequency)といい、表9-1の値が用いられる。

9.6 室内騒音の許容値

室内騒音の許容値を表9-2に示す。最も基本的な基準値としては騒音レベル[dB(A)]が用いられるが、より詳細な検討を必要とする場合には、Beranekによって提案されたNC(noise criteria)値が使われることが多い。これは、騒音のオクターブバンド分析結果を図9-5にプロットして、すべての帯域で基準曲線を下回るような最小の基準値をNC値とするものである。

9.7 騒音の環境基準

表9-1 1および1/3オクターブバンド
中心周波数

オクターブ		オクターブ	
1/3	1	1/3	1
25	31.5	800	1,000
31.5		1,000	
40		1,250	
50	63	1,600	2,000
63		2,000	
80		2,500	
100	125	3,150	4,000
125		4,000	
160		5,000	
200	250	6,300	8,000
250		8,000	
315		10,000	
400	500	12,500	16,000
500		16,000	
630		20,000	

環境基本法第16条に基づいて、一般騒音や航空機騒音などの環境基準が設定されている。

一般騒音に対する環境基準は、表9-3に示すように、 L_{Aeq} で与えられている。

航空機騒音に対する環境基準はICAO（国際民間航空機構）の定めたWECPNL（weighted equivalent continuous perceived noise level）によって表9-4のように設定されている。WECPNLの算出は極めて煩雑であるが、わが国の環境基準では次式に示す簡便法が用いられている。

$$WECPNL = \overline{L}_A + 10 \log_{10}(n_1 + 3n_2 + 10n_3) - 27 \quad (9.4)$$

ここで、 \overline{L}_A は1日に観測される全航空機のうち、暗騒音より10dB(A)以上大きいもののピーク値（騒音計の時間重み特性はS）のエネルギー平均値であり、 n_1, n_2, n_3 は、それぞれ、7:00～19:00, 19:00～22:00, 22:00～7:00の時間帯における飛行回数である。

- 1) 日本建築学会編：建築設計資料集成1 環境, 丸善, 1978
- 2) L. L. Beranek, Noise Control 3, p. 19-27 (1957) の提案を T. J. Schultz, J. Acoust. Soc. Am. 43, p. 637-638 (1968) が修正したもの
- 3) 「騒音に係る環境基準について」環境庁告示第64号（平成10年9月30日）
- 4) 「航空機騒音に係る環境基準について」環境庁告示第154号（昭和48年12月27日）

表9-2 室内騒音の許容値¹⁾

dB(A)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
NC	10～15	15～20	20～25	25～30	30～35	35～40	40～45	45～50	50～55
うるささ	無音感 ———— 非常に静か ———— 特に気にならない ———— 騒音を感じる ———— 騒音を無視できない								
会話・電話への影響	5m離れてささやき声がかえる ———— 10m離れて会議可能 ———— 普通会話(3m以内) ———— 大声会話(3m)								
スタジオ	無響室	アナウンススタジオ	ラジオスタジオ	テレビスタジオ	主調整室	一般事務室			
集会・ホール		音楽堂	劇場(中)	舞台劇場	映画館・プラネタリウム	検査室	ホールロビー		
病院		聴力試験室	特別病室	手術室・病院	診察室	宴会場	待合室		
ホテル・住宅				書斎	寝室・客室	小会議室	ロビー		
一般事務室				重役室・大会議室	応接室		一般事務室		タイプ・計算機室
公共建物				公会堂	美術館・博物館	図書閲覧	公会堂兼体育館	屋内スポーツ施設(拡)	
学校・教会				音楽教室	講堂・礼拝堂	研究室・普通教室	廊下		
商業建物					音楽喫茶店	書店	一般商店		
					宝石店・美術品店	銀行・レストラン	食堂		

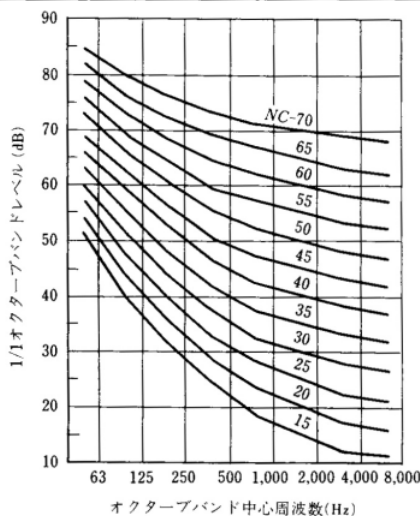


図9-5 NC曲線²⁾

表9-3 騒音に係る環境基準（一般地域）³⁾ 単位：dB(A)

地域の類型	基準値	
	昼間 (06:00～22:00)	夜間 (22:00～06:00)
AA	50 dB 以下	40 dB 以下
A および B	55 dB 以下	45 dB 以下
C	60 dB 以下	50 dB 以下

AA：医療施設、社会福祉施設等が集合して設置される地域などに静穏を要する地域

A：専ら住居の用に供される地域

B：主として住居の用に供される地域

C：相当数の住居と併せて商業、工業等の用に供される地域

表9-4 航空機騒音に係る環境基準⁴⁾

地域の類型	基準値 (WECPNL)
I（主として住居の用に供される地域）	70
II（I以外の地域であって通常の生活を保全する必要のある地域）	75