

第2章 橋梁の騒音・低周波空気振動

2. 1 音の一般的性質

2. 1. 1 音に関する基礎的な知識

(1) 音波の性質

音は空気の密度変化が伝播する波、すなわち疎密波であり、波の進行方向と同一方向に空気が振動する。以下に音波に関連する基本的な性質を挙げる。

$$\text{常温の空気の密度 } \rho = 1.20 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\text{空気中の音速 } c = 331.5 + 0.61\theta = 344 \text{ [m/s] (気温 } \theta = 20^\circ\text{C)}$$

$$\text{固有音響抵抗 } \rho c = 1.20 \times 344 = 410 \text{ [kg/s}\cdot\text{m]}$$

音波の振幅を A [m]、周波数を f [Hz] とすれば、空気粒子の平均位置からの変位 a は、

$$a = A \cdot \sin 2\pi f t \text{ [m]} \quad (2.1.1)$$

空気粒子の速度 v は、

$$v = A \cdot (2\pi f) \cdot \cos 2\pi f t \text{ [m/s]} \quad (2.1.2)$$

音波の波長 λ は音速と周波数から次式のように求められる。

$$\lambda = c/f \text{ [m]} \quad (2.1.3)$$

周波数 $f = 20 \sim 20\text{kHz}$ (可聴周波数範囲) の音波の波長は約 $20\text{m} \sim 2\text{cm}$ の範囲にあり、構造物や防音壁等の寸法と同程度であるために、回折、共振、透過などが生じ易く、伝播を遮断することが難しい。

(2) 音圧 (Sound Pressure)

音波によって生じる大気圧からの圧力変動を音圧 p (Sound Pressure) という。

$$p = \rho c v \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.1.4)$$

大気圧が約 $1,013\text{mbar}$ (約 10^5N/m^2) であるのに対して、一般的な騒音は相当に強い場合でも約 $1,000 \mu\text{bar}$ (100N/m^2) 程度の微小な圧力変動である。

(3) 音響出力と音の強さ

音響出力 (Sound Power) は、音源から単位時間に放出される音のエネルギーであり、 W [W] で表わす。音の強さ (Sound Intensity) は、音の進行方向に直交する単位平面を単位時間に通過する音のエネルギーであり、 I [W/m^2] で表わす。音の強さ I は、音波の粒子速度 v と音圧 p から次式のように表される。

$$I = vp = \rho c v^2 = p^2 / \rho c \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.1.5)$$

(4) デシベル (decibel)

騒音の大きさあるいは音源の強さを表わす単位としてデシベル [dB] が用いられる。デシベルは2個の数量の比率を対数表示する相対的な数値であり、本来的には絶対的な値を示すもので

はないが、音響分野では別に定めた基準値に対する比として表示することで大きさの単位として使い、デシベル表示された数値をレベルと呼んでいる。基準値 p_0 に対する数値 p のデシベル表示は、次式のように定義される。

$$\Delta L = 10 \cdot \log(p/p_0) \quad [\text{dB}] \tag{2.1.6}$$

各 p/p_0 に対する ΔL の値は、近似的に以下のように表わされる。

p/p_0	0.01	0.1	1	2	5	10	30	100	1000
ΔL [dB]	-20	-10	0	3	7	10	15	20	30

この関係は、図-2.1.1 に示す片対数グラフからも求められる。

(5) 音の強さと音圧レベル

音の強さのレベル (Sound Intensity Level) は単位面積当りの音のエネルギーをデシベル表示したものであるが、音圧レベル (Sound Pressure Level) と実質的に同一となるので、記号としては SPL を用いる。デシベル表示の基準値としては、人間の耳の聴力感覚で 1000 Hz 付近の最小可聴値と考えられる次の値を用いる。

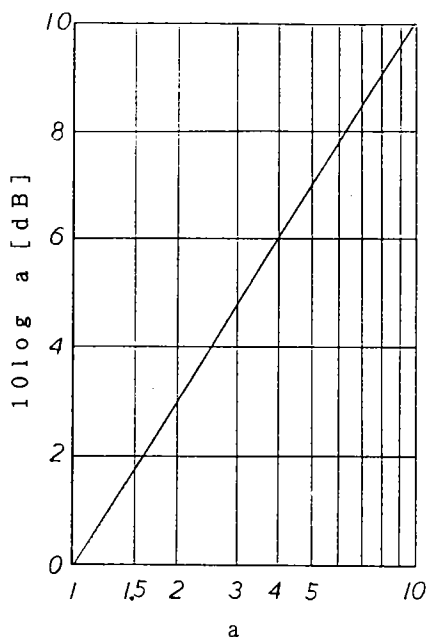
$$I_0 = 10^{-12} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \tag{2.1.7}$$

$$p_0 = \sqrt{\rho c I_0} = \sqrt{400 \times 10^{-12}} = 2 \times 10^{-5} \quad [\text{N}/\text{m}^2] \tag{2.1.8}$$

したがって音圧レベル (すなわち音の強さのレベル) は次式となる。

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 10 \log(I/I_0) \quad [\text{dB}] \\ &= 20 \log(p/2 \times 10^{-5}) \quad [\text{dB}] \end{aligned} \tag{2.1.9}$$

音圧、音の強さ、音圧レベルの関係を表-2.1.1 に示す。音の強さが $10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$ の音の音圧は $0.00002 \text{N}/\text{m}^2$ であり、その音圧レベルは 0dB である。また音の強さが $10^{-2} \text{W}/\text{m}^2$ の場合には、音圧が $2 \text{N}/\text{m}^2$ 、音圧レベルは 100dB である。



(a = 4 で 6 dB と読む)

図-2.1.1 デシベルの求め方¹⁾

表-2.1.1 音圧レベル

20	120	1
10	114	
	110	10^{-1}
2	100	10^{-2}
1	94	
	90	10^{-3}
0.4	86	
0.2	80	10^{-4}
0.1	74	
	70	10^{-5}
0.04	66	
0.02	60	10^{-6}
0.01	54	
	50	10^{-7}
0.002	40	10^{-8}
0.001	34	
	30	10^{-9}
0.0002	20	10^{-10}
0.0001	14	
	10	10^{-11}
0.00002	0	10^{-12}
音 圧 ($\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$)	音 圧 レ ベル (dB)	音 の 強 さ ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$)

(6) 音源のパワーレベル

パワーレベル (Power Level) は、その音源の音響出力 W [W] を dB 表示したものであり、記号は PWL を用いる。基準値は音圧レベルと同様に $10^{-12}W$ であり、次式で表わされる。

$$PWL = 10 \log(W/10^{-12}) \text{ [dB]} \quad (2.1.10)$$

PWL、SPL とともに、単位が dB で同一の式で表わされるため紛らわしいが、PWL は音源の強さを示すもので 1 つの音源に対して 1 個の値しかなく基本となる単位は W であるのに対して、SPL はそれぞれの場所における音の強さを示すもので基本となる単位は W/m^2 である。代表的な音源の音響出力、PWL、SPL を表-2.1.2 に示す¹⁾。

表-2.1.2 身近な音源の音響出力、パワーレベル、音圧レベル

音源	音響出力 [W]	パワーレベル PWL [dB]	音圧レベル (距離) SPL [dB]
ジェット機	10^4	160	109 (100m)
ニューマチックハンマ	1	120	109 (1m)
ピアノ	2×10^{-2}	103	92 (1m)
普通の会話	2×10^{-5}	73	62 (1m)
ささやき声	10^{-9}	30	19 (1m)

(7) 聴感曲線と音の大きさ

人間の聴覚は同一の音圧レベルであっても、周波数によって聞こえ方に相当の差がある。図-2.1.2 は ISO R 226 (International Organization for Standardization) に規格化された純音についての聴感曲線である。この曲線は、周波数 1000Hz の音圧レベルの音と同じ大きさに聞こえる可聴範囲内の周波数の音圧レベルを結んで求めたものである。したがって同一曲線上の音であれば音圧レベルが異なっても同じ大きさに聞こえる。

騒音の大きさのレベル LL (Loudness Level) は、同じ大きさに感じる 1000Hz の周波数の音圧レベルの値に換算して表示するものであり、大きさの単位として Phone を用いる。以前では 1000Hz の最小可聴値を、音圧レベルの 0dB (0 Phone) すなわち $0.00002N/m^2$ としていたが、4 Phone 以下では一般に聞こえないことが分かったので、新しい曲線では最小可聴値が 4.2 Phone に修正された。この聴感曲線における

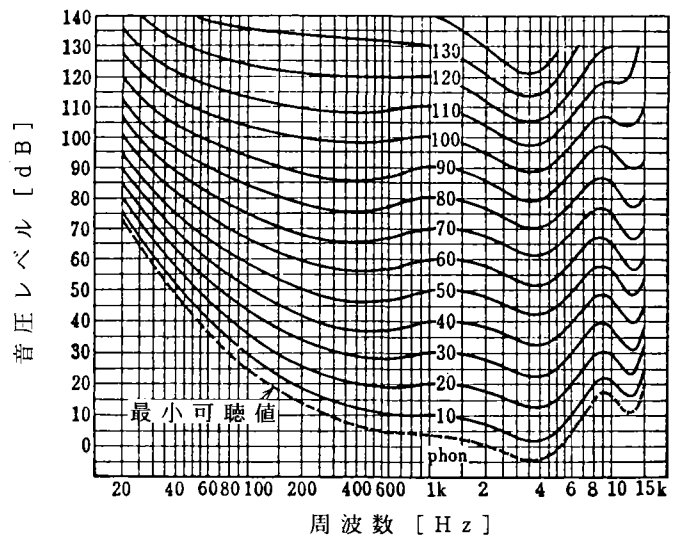


図-2.1.2 聴感曲線 (ISO R 226)

音圧レベルと Phone 数の換算係数を表-2.1.3 に示す。これは音圧レベル x から騒音の大きさのレベル y を計算によって求める時に便利である。

表-2.1.3 聴感曲線の係数¹⁾

$$y = a + bx + cx^2$$

周波数 (Hz)	a	b	c	最小可聴音圧 レベル [dB]
20	-217.2	3.669	-0.00927	+74.3
50	-73.0	2.021	407	41.7
70	-49.1	1.723	305	32.9
100	-33.5	1.570	269	25.1
200	-14.7	1.404	242	13.8
300	-8.1	1.325	218	9.4
500	-3.0	1.205	151	6.0
700	-1.0	1.109	-0.00084	4.7
1000	0	1	0	4.2
2000	+3.3	0.924	+0.00100	+1.0
3000	+6.9	0.937	120	-2.9
5000	+5.3	0.973	059	-1.1
6000	-0.5	1.011	+0.00014	+4.6
8000	-13.3	1.159	-0.00089	15.3
10000	-16.8	1.314	203	16.4
12000	-12.7	1.450	350	12.0
14000	-22.7	1.777	591	16.0
15000	-43.0	2.146	-0.00772	+24.1

(8) 騒音計の聴感補正と騒音レベル

騒音計の指示値を音の大きさのレベルに対応させるための聴感特性としてA、平坦、Cの3特性があるが、A特性に比べて平坦特性とC特性は測定値と実際の聴感との差が大きいため、A特性を使って聴感補正するのが普通である(第3章 図-3.1.4参照)。このような補正回路をもつ騒音計で計測された値が騒音レベル(A-weighted sound pressure Level)であり、音圧レベルの[dB]と区別するため[dB(A)]またはdBAと表記する。

2. 1. 2 音の伝播

(1) 音の反射

音波は媒質が変化する境界面や同一媒質でも密度が変化する境界面に到達すると、進行方向が変わって再び元の媒質中を進行する現象を起こす。通常人が聞こえる音波の波長は2cm~20m程度であるが、音波の波長に比べて境界面の広がり十分大きいとき、光の反射に関する法則と同様な法則が成立し入射角と反射角は等しくなる。しかし一般的には境界面の広がり十分でない場合が多いので光のような正確な反射とはならない。

(2) 音の屈折

媒質等が変化する境界面において音波は反射されるが、一部は他の媒質の中に入射する。その際境界面において進行方向が変化する現象を屈折という。音波の場合、屈折が問題となるのは媒質の変化よりむしろ気温や風の影響である。

晴れた日の夜間から朝方にかけては、非常に良く遠方の音が聞こえることがある。これは大気の温度差により音波が屈折して伝播するためである。昼間は通常地面に近い所の気温が高く、地上からの高さが高くなるにつれて気温が低下する。このため図-2.1.3(a)に示すように、

波面は上方を向き地表面付近では無音域を生じる。逆に晴れた夜間など地表が放射冷却によって冷やされ、かえって上空の方が気温が高くなる。この場合音速は上空の方が大きくなって波面が下方を向き、図-2.1.3 (b) のように地面に沿って遠方まで音が伝播することになる。これと同様な現象は強風時においても観測される。一般に風速は地上から上空へ行くほど大きくなることから、音源より風上へ伝播する音波は上方へその方向が曲げられ、図-2.1.4 に示すように音源の風上では無音域が生じる。

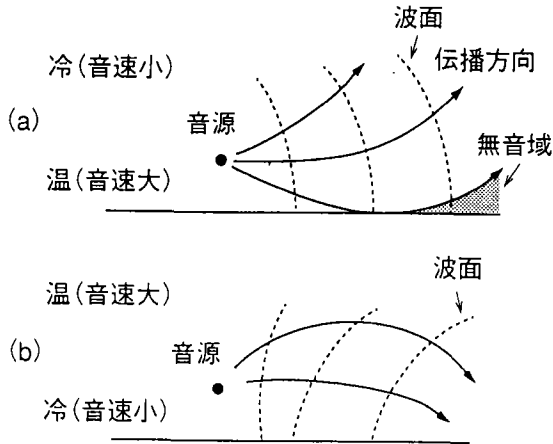


図-2.1.3 音波の屈折

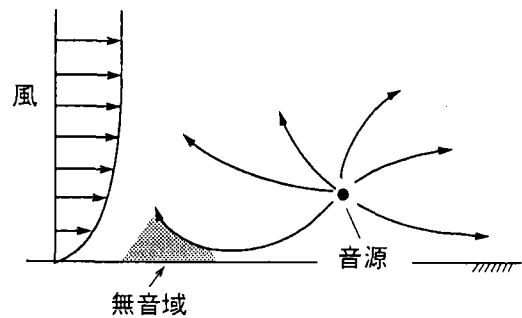


図-2.1.4 強風時の音波の伝播

(3) 音の回折

音波の伝播経路に遮へい物があってもその物体の陰で音を聞くことができる。このように遮へい物の幾何学的な陰の中に波動の影響が入り込むことを回折という。回折についてはホイヘンスの原理により説明できる。すなわち図-2.1.5 に示すように、ある時刻に波面が S_0 に達したのち微小時間後にできる波面 S は、 S_0 上の各点をそれぞれ新しい波源とした素元波の包絡面となる。回折の大きさの程度は音の波長と障壁の大きさとの関係によって決まり、障壁に比べて波長が長ければ回折によって伝播する音の量は大きくなる。同じ大きさの障壁では低周波数の音ほど波長が長いので回折が大きい。騒音の場合、回折による影響が問題となるのは防音壁でありこれについては第5章で述べる。

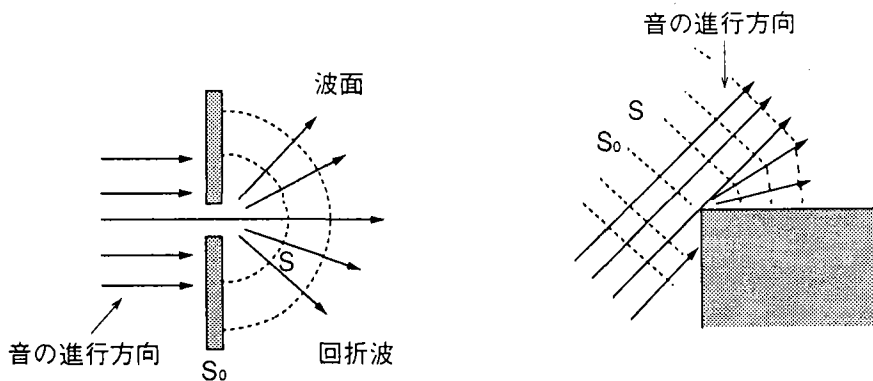


図-2.1.5 音波の回折

2. 1. 3 音の減衰

空気中の音波の減衰を考える場合、その要因としては距離減衰と空気の吸音減衰の2つが挙げられる。前者は音源から音波が伝播する間に波面が広がり、それに伴い単位面積当りの音のエネルギーが減少することによるものである。一方、後者は空気自身の減衰能によるものである。一般には距離減衰の方が吸音減衰に比べ支配的であり、特に短距離の音の伝播については吸音減衰は無視できる程度に小さい。

(1) 距離減衰

【点音源】 点状の音源（点音源）から、球面状にあらゆる方向に同じ強さで音が伝播する場合を考える。このとき音源からの距離 r [m] の地点における単位面積当り1秒間に通過する音のエネルギー、すなわち音の強さ I [W/m^2] は、 W [W] を音響出力として次式で与えられる（図-2.1.6 (a)）。

$$I = W/4\pi r^2 \quad (2.1.11)$$

また点音源が地上にあり半球状に音波が広がる場合は次のようになる。

$$I = W/2\pi r^2 \quad (2.1.12)$$

これらの場合、音の強さは距離の2乗に反比例することがわかる。音圧レベルSPLは音響出力のパワーレベルPWLによって次のように表わされる。

$$SPL = PWL - 20 \log r - K_1 \quad (2.1.13)$$

ただし、

$$K_1 = \begin{cases} 10 \log 4\pi = 11 & \text{: 球状の波面の場合} \\ 10 \log 2\pi = 8 & \text{: 半球状の波面の場合} \end{cases}$$

$$PWL = 10 \log W - 120 \quad [\text{dB}] \quad \text{: 音源のパワーレベル}$$

また式 (2.1.13) より距離 r_1 と r_2 間の音圧レベルの差 ΔSPL [dB] は、

$$\Delta SPL = SPL_1 - SPL_2 = 20 \log (r_1/r_2) \quad (2.1.14)$$

となる。今距離が2倍になるときを考えれば2点間の音圧レベルの差は

$$\Delta SPL = 20 \log (1/2) = -6 \text{dB}$$

となり、距離が2倍になるに従い6dBずつ音圧レベルが減衰することがわかる。

【線音源】 自動車が頻繁に通行する場合や鉄道車両が通行する場合、音源をそれぞれ無限長または有限の長さを持つ線音源とみなすことができる。ここでは最も簡単な無限長の場合を例にとり距離減衰の効果を考えてみる。

音の強さ I は線音源から距離 r に反比例して減衰する（図-2.1.6 (b)）。

$$I = W/2\pi r \quad (2.1.15)$$

点音源と同様に音響出力をパワーレベルで表わせば、

$$SPL = PWL - 10 \log r - 8 \quad (2.1.16)$$

したがって式 (2.1.16) より距離 r_1 と r_2 の点の音圧レベルの差は、

$$\Delta SPL = SPL_1 - SPL_2 = 10 \log (r_1/r_2) \quad (2.1.17)$$

で表される。距離が2倍となったときの音圧レベルの差は、

$$\Delta SPL = 10 \log (1/2) = -3 \text{dB}$$

となり、距離が2倍になるにつれて3dBずつ音圧レベルが下がることになる。

【面音源】 短辺 a 、長辺 b の矩形の面音源について、音源からの距離 r と音圧レベルSPLの関係を模式的に表わせば図-2.1.6 (c) のようになる。同図から、 $r < a/\pi$ の領域では距離減衰による効果がほとんど生じず、逆に $r > b/\pi$ の領域では音源からの距離 r が2倍になるにつれて6dBずつ音圧レベルが下がり、点音源と同様な減衰状態となることがわかる。面音源が無限の広がりを持つ場合、音は平行に伝播するので音の拡散による距離減衰はなく音圧レベルは一定である。

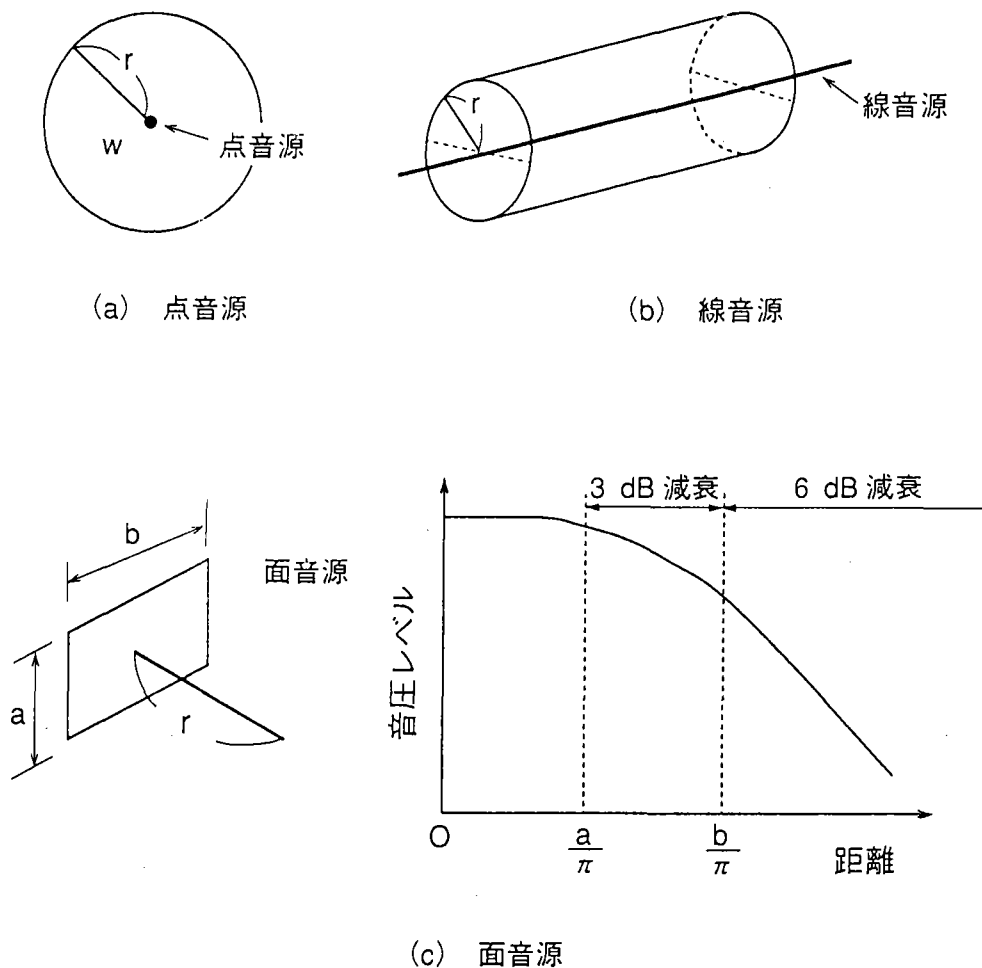


図-2.1.6 音の距離減衰

(2) 吸音減衰

大気中を音波が伝播する過程で空気の内部減衰や地表面で音のエネルギーは吸収される。したがって音の減衰には、前述した距離減衰に加えて吸音減衰が加算される。吸音減衰は空気の温度、湿度、音波の振動数等の要因によりその吸音効果に変化するが、一般には低い振動数のものほど減衰の影響を受けず遠くまで伝播する。また特定の温度、湿度で特定の振動数の音が吸音されやすいといった現象が生じることがある。表-2.1.4に空気中の音の減衰値を振動数、温度、相対湿度ごとにまとめたものを示す。

表-2.1.4 空気中の吸音減衰

[dB/100m]

周波数 [Hz]	温度 [°C]	相 対 湿 度 [%]			
		30	50	70	90
500	-10	0.56	0.32	0.22	0.18
	0	0.28	0.19	0.17	0.16
	10	0.22	0.18	0.16	0.15
	20	0.21	0.18	0.16	0.14
1000	-10	1.53	1.07	0.75	0.57
	0	0.96	0.55	0.42	0.38
	10	0.59	0.45	0.40	0.36
	20	0.51	0.42	0.38	0.34
2000	-10	2.61	3.07	2.55	1.95
	0	3.23	1.89	1.32	1.03
	10	1.96	1.17	0.97	0.89
	20	1.29	1.04	0.92	0.84
4000	-10	3.36	5.53	6.28	6.05
	0	7.70	6.34	4.45	3.43
	10	6.58	3.85	2.76	2.28
	20	4.12	2.65	2.31	2.14
5940	-10	4.11	6.60	8.82	9.48
	0	10.54	11.34	8.90	6.84
	10	12.71	7.73	5.47	4.30
	20	8.27	4.67	3.97	3.63

(ISO R 507)

2. 2 橋梁騒音の特性

2. 2. 1 橋梁騒音の分類

橋梁から発生する騒音のうちよく知られているものは、無道床鉄道橋の列車騒音、道路橋伸縮装置からの衝撃音、低周波空気振動などさまざまなものがある。それらは必ずしも明快に区分できるものではないが、要因、現象、橋梁形式に分けて考えてみるとおよそ次のように分類できる。

要因	{ 走行音：走行車両本体および車輪と走行面の間から発生するもの 構造音：橋梁構造の全体振動や局部振動から発生するもの 衝撃音：走行面の段差によって発生するもの	橋梁形式	{ 道路橋 鉄道橋		
				現象	{ 可聴音 低周波空気振動

要因別の分類において衝撃音は走行音に含まれるという見方もあるが、衝撃音が橋体で増幅されて放出されることを考えると構造音ともみなせるので、ここでは衝撃音を独立な項目として扱うことにした。

これらに実際の橋梁騒音の例をあてはめると表-2.2.1のようになる。ここで道路橋における部材の局部振動と鉄道橋における低周波空気振動は、相対的に騒音レベルが小さく現状ではあまり問題とされていないという意味で括弧書きとした。

表-2.2.1 橋梁騒音の分類

	道路橋	鉄道橋
走行音	機関音、タイヤ音、風切り音、警笛音、トランスミッション音などの可聴音	転動音、駆動音、風切り音、集電系騒音などの可聴音
構造音	橋梁の全体振動に伴う床版からの低周波空気振動 (部材の局部振動)	部材の局部振動からの可聴音 (低周波空気振動)
衝撃音	伸縮装置部の段差に起因する可聴音と低周波空気振動	レールジョイント部の段差に起因する可聴音

2. 2. 2 道路橋の騒音

(1) 可聴音

道路橋から発生する可聴音で問題となるのは、走行音と伸縮装置からの衝撃音である。

伸縮装置からの衝撃音は橋梁特有の騒音であるが、走行音は一般の道路交通騒音と基本的に同様である。

走行音は、機関音、タイヤ音、風切り音、警笛音あるいはトランスミッション音などに大別され、このうち機関音とタイヤ音がその大半を占める。機関音はシリンダー内の燃焼や動弁系の駆動などによって生じる（エンジン音）ほか、吸排気の際の空気の流れや冷却ファンの回転によっても生じる。これらの騒音レベルはエンジン回転数の対数に比例するとみなされ、ディーゼルエンジンを搭載した大型車では最大の音源となっている。タイヤ音はいくつかの構成要素からなり、その要素にはトレッドパターン内の空気が接地の際に放出される音（パターンノイズ）、タイヤと路面間のすべりや衝突によって生じる音（スケルチ）、タイヤが路面の凹凸によって振動する音（スキール）などがある。騒音レベルにおける機関音とタイヤ音の構成比率は、トップギアではタイヤ音、それ以外のギアでは機関音が優る。図-2.2.1に道路騒音スペクトルの一例を示すが、道路橋について公表されている騒音データは少ない。

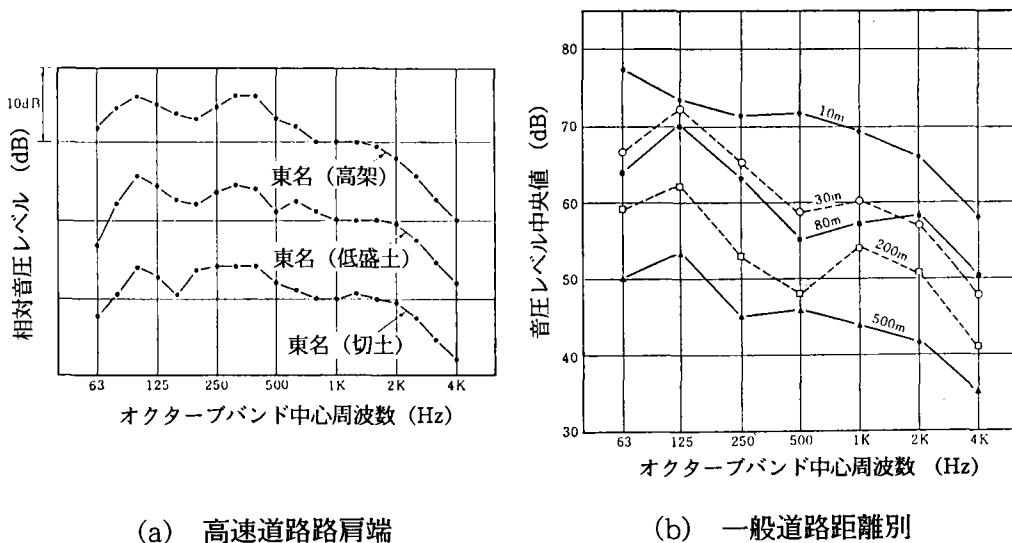


図-2.2.1 道路騒音スペクトルの例⁴⁾

騒音の中でも衝撃性の音は喧噪感の大きいものが多い。自動車が橋梁の伸縮装置を乗り越える時に発生する衝撃音は、橋体が共鳴箱の働きをする一方ある間隔を置いて多数回発生するのでよく問題とされる。この場合、個々の衝撃音の大きさもさることながら多数回の衝撃音全体の累積効果が問題となり、発生回数が多ければそれだけやかましさが増加する。衝撃音の原因は、伸縮装置前後の舗装の凹凸や伸縮装置の目違いなどいずれも走行面の段差であるが、特に沓や伸縮装置が損傷している場合には大きな衝撃音の原因となっている。図-2.2.2は実橋で測定された音圧レベルの一例であるが、伸縮装置部通過時の音圧が著しく大きいことがわかる。

(2) 低周波空気振動

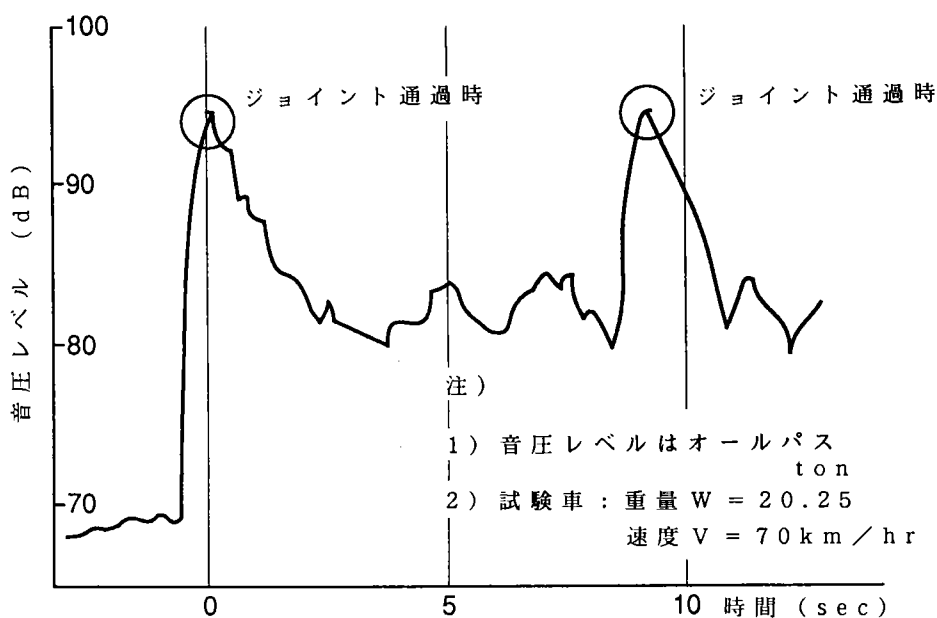
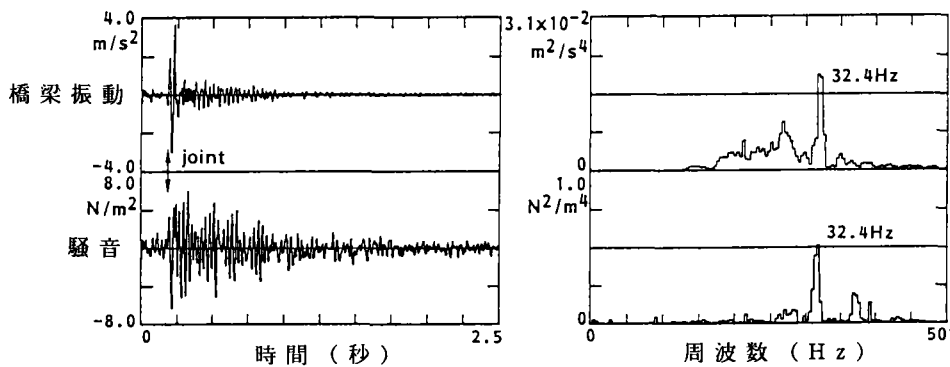


図-2.2.2 車両通過時の音圧レベルの例⁵⁾

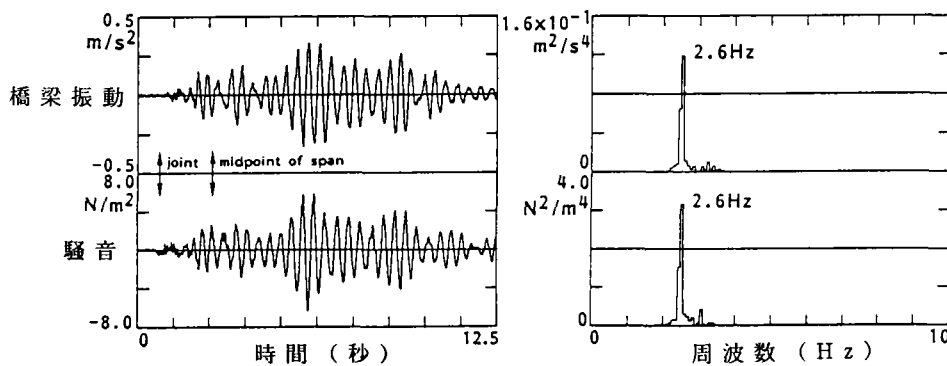
中小支間道路橋において発生する空気振動は、車両が伸縮継手部を通過する際に生じる衝撃的な振動（ジョイント音）と、車両が橋梁の支間中央を走行する際に生じる比較的定常的な振動（スパン音）の2種類に大別される^{6) 7)}。前者は車両のばね下振動数の周波数帯域にあり、後者は車両のばね上振動数の周波数帯域にあるのが特徴である。

図-2.2.3に振動と低周波空気振動の測定結果の一例を示す⁸⁾。図中の(a)はジョイント音、(b)はスパン音であり、それぞれにおいて上段が橋梁振動加速度、下段が低周波空気振動に関するデータを表わす。橋梁振動と低周波空気振動は類似した波形とスペクトルを示し、橋梁の低周波空気振動が橋梁の全体振動や車両の伸縮継手部通過時の衝撃に伴って床版面から放射される空気振動であることを裏付けている。

ジョイント音の卓越周波数は10~40Hz程度で上限は可聴域に含まれる。その波形は車両が伸縮継手部を通過時に最大となり、車両の通過後直ちに減衰する。また観測される音のレベルはオーバーオール(OA)値で90~100dBとされている。スパン音の卓越周波数は2~5Hz程度であり、その波形は比較的定常で車両通過後の減衰も緩やかである。これは橋梁がそれ自身の固有モードで振動するためであり、観測される音のレベルはOA値でジョイント音より10dB程度小さい場合が多い。



(a) A橋におけるジョイント音



(b) B橋におけるスパン音

図-2.2.3 重車両走行時の振動・騒音波形とパワースペクトル⁸⁾

2. 2. 3 鉄道橋の騒音

(1) 走行音

列車から発生する騒音には、転動音、駆動音、風切り音、集電系騒音などがありこれらを総称して走行音と呼ぶ。列車騒音におけるこれら各音源の寄与率は、列車の形式によって異なりまだ明確でないところもあるが、おおむね転動音と駆動音が主要な騒音源であり、新幹線を除いて風切り音や集電系騒音の影響は小さい。

転動音とは車輪とレール間で発生する騒音である。発生原因としては車輪とレール間のきしみ（スキール）、車輪の転動とレールの凹凸に起因する強制振動（ローリングノイズ）、車両やレールの固有振動などがあり、またレールジョイントを通過する際の衝撃音もこれに含めて取り扱われることが多い。駆動音は列車の電動機およびこれに付随する駆動装置から放射される騒音で、通勤電車などではこれが占める割合が大きい。

(2) 構造音

構造音とは、衝撃や振動が橋体内を伝播する際に鋼板が板振動を引起こして放射する音であり、もともとは鋼鉄道橋の可聴騒音において走行音と対比するために用いられ始めた言葉である。このようなことから鉄道橋の構造音はもっぱら可聴音を指すが、衝撃音の位置付けが曖昧

第2章 橋梁の騒音・低周波空気振動

曖昧なことは前述した通りである。図-2.2.4が構造音の原因となる橋梁部材の振動加速度を測定した結果の一例である。

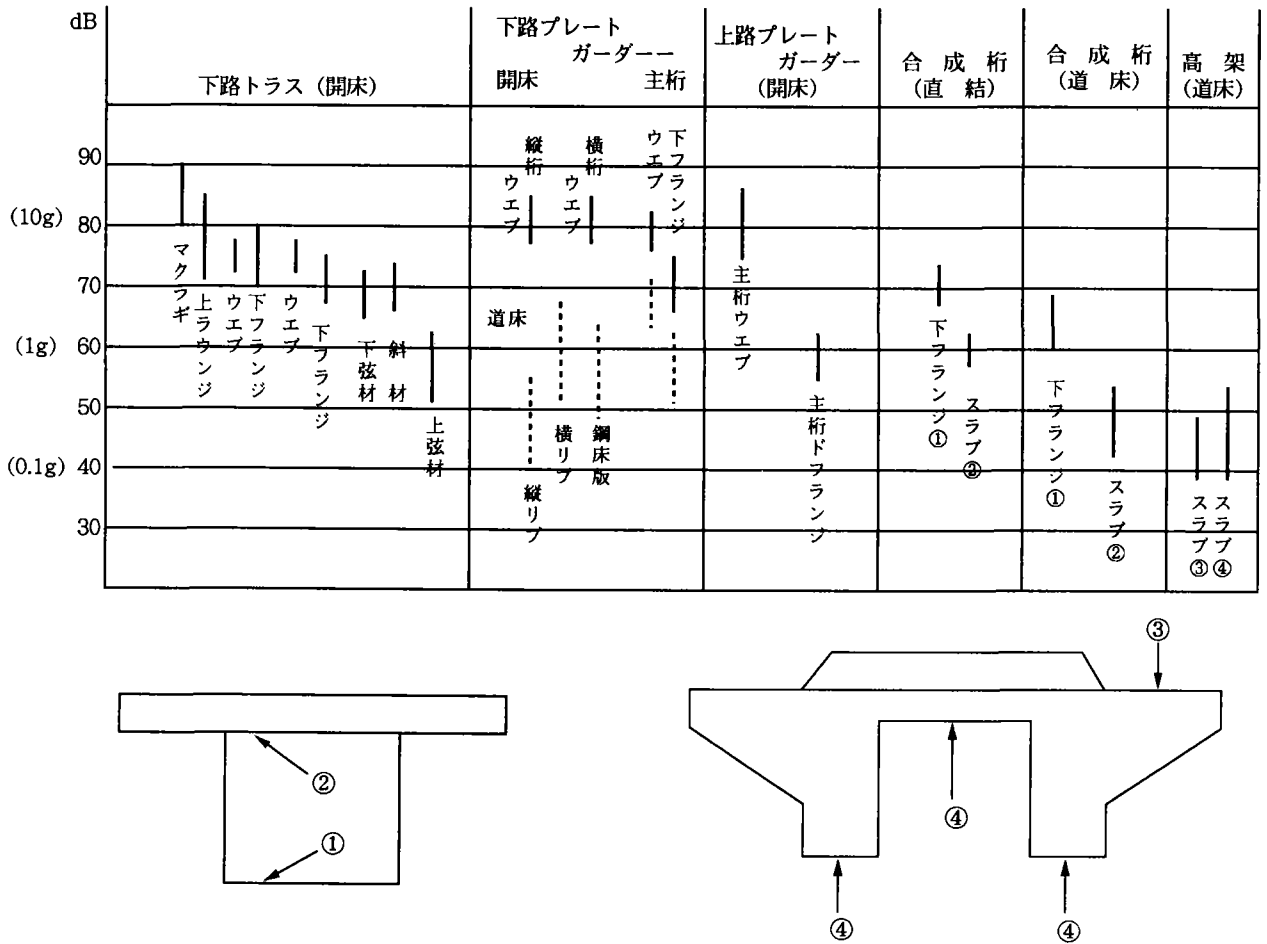


図-2.2.4 橋梁部材の局部振動⁹⁾

図-2.2.5は鉄道橋騒音の代表的なスペクトルであるが、構造音と走行音の比率はほぼ半々と考えられており、道路橋の場合と異なって可聴騒音の対策として構造音対策が非常に重要とされている。橋梁形式別に見ると無道床鉄桁の騒音が特に著しく、合成桁（直結）、有道床鉄桁、合成桁（道床）の順に騒音レベルが低下する。

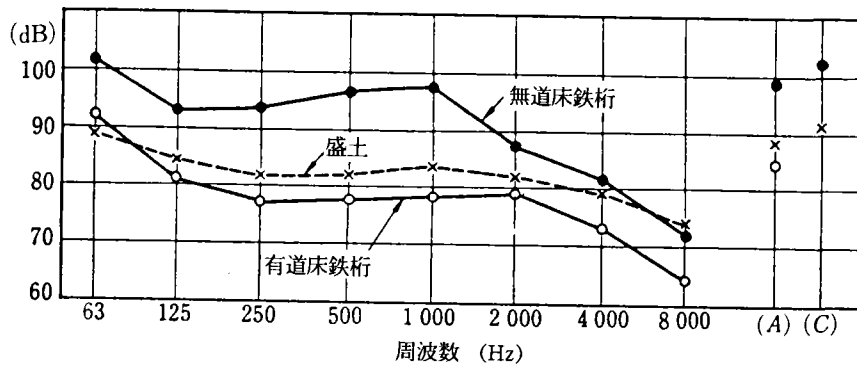


図-2.2.5 鉄橋橋の騒音スペクトルの例¹⁰⁾

2. 2. 4 高架橋の騒音分布

民家が近接する高架橋周辺では橋梁騒音が特に問題となり易い。ここでは高架橋周辺の騒音レベルの概略を把握するために、既往の研究によって得られている高架橋周辺の騒音の分布状況を示す。

図-2.2.6は、高架道路橋で測定された低周波空気振動（ジョイント音）の平面的な広がりを示したものである。

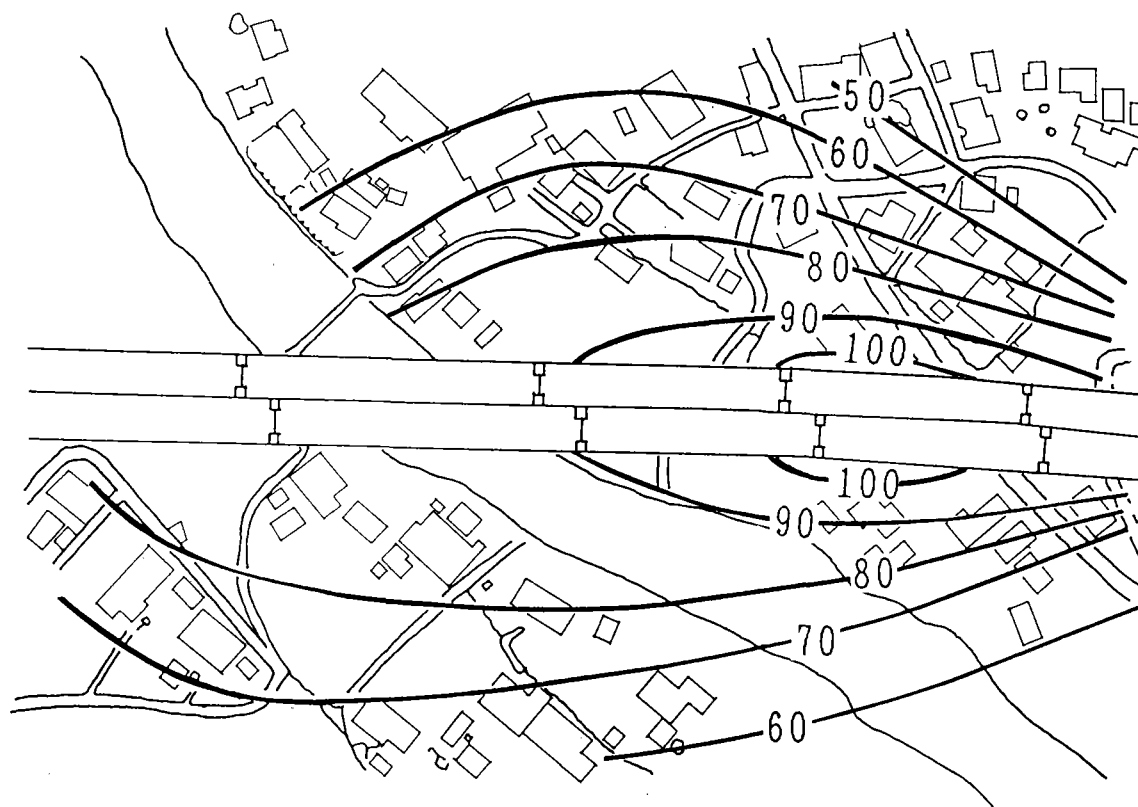
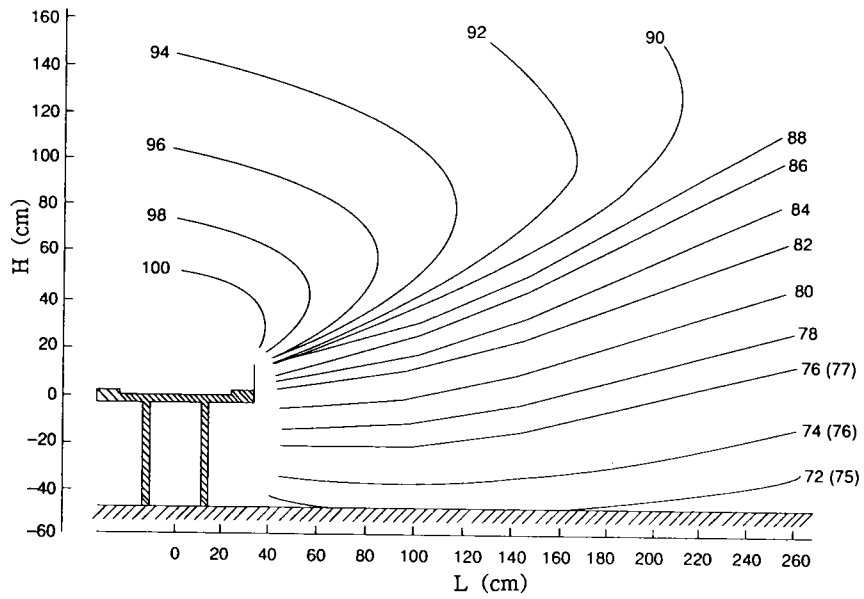


図-2.2.6 高架道路橋における音圧波形ピーク値の分布

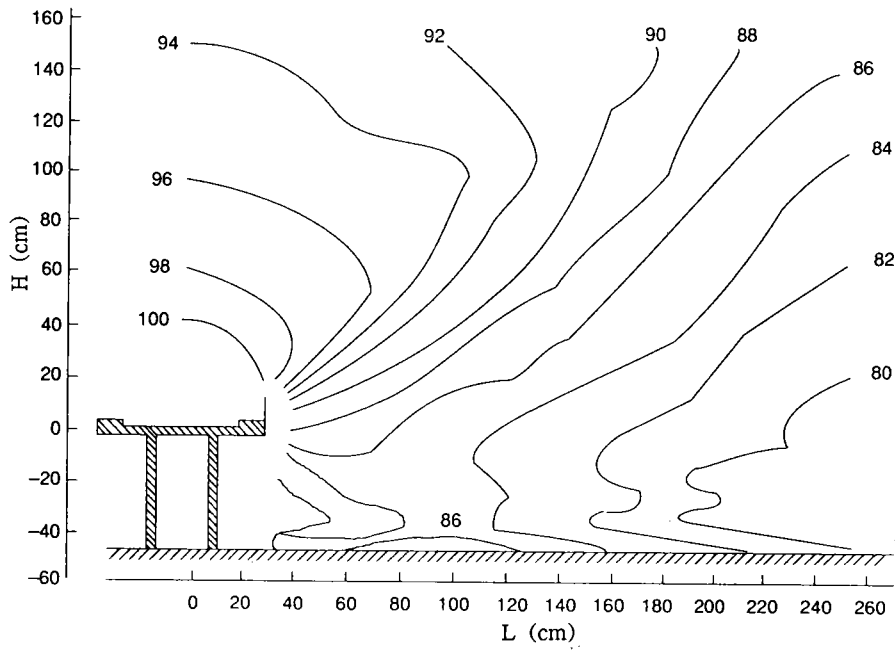
図-2.2.7は、高架道路橋をモデル化した室内実験において得られた横断面内の騒音の等音圧曲線である。

また図-2.2.8は、高架鉄道橋（コンクリート高架橋と無道床鉄桁）において測定された騒音レベルの分布である。

高架道路橋の例では、地表面からの反射によって地表部の騒音が多少増加している。高架鉄道橋ではコンクリート高架橋が高架下面で騒音が小さくなっているのに対して、無道床鉄桁では逆に高架下面のほうが軌道面より大きくなっているのが特徴的である。これは軌道部分から高架下面に向けて直接音が透過したり、鋼桁下面から構造音が放射された結果と考えられる。このことから、鉄道橋では鋼桁の下面から伝播する騒音を防止することも重要であることがわかる。



(a) 計算値 (地面反射なしとする。ただし、()内は地面反射ありとする。)



(b) 実験値 (反射性地面)

図-2.2.7 高速道路橋の等音圧曲線 (室内実験)

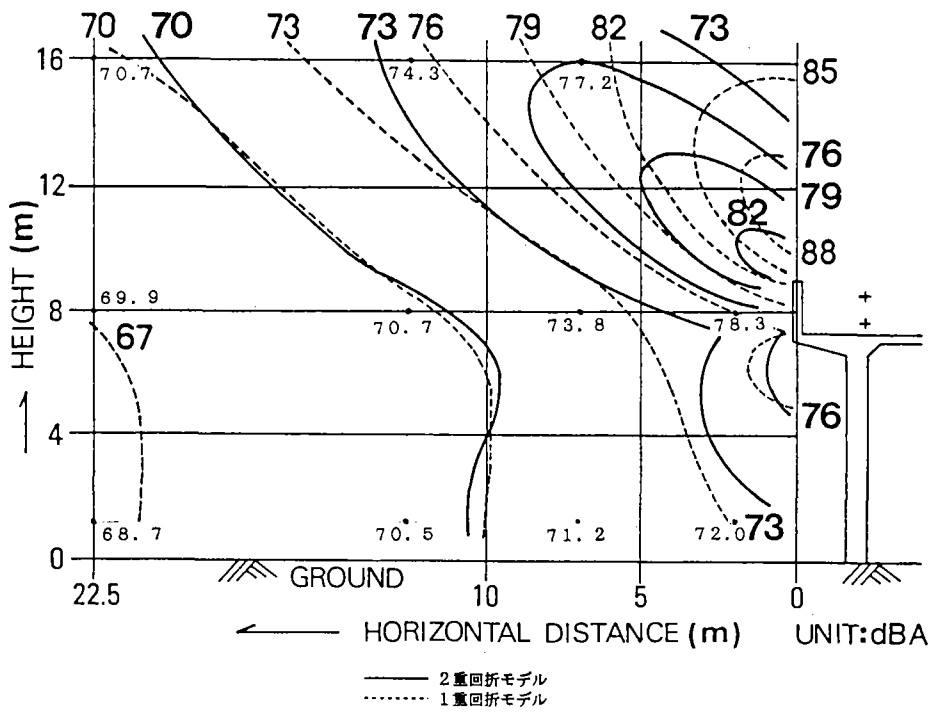
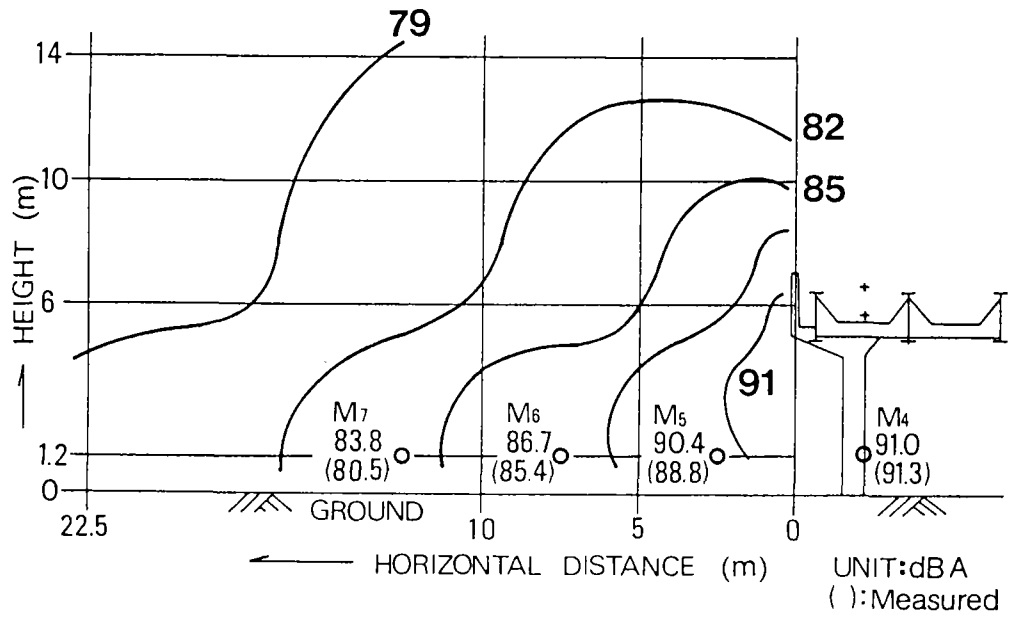


図-2.2.8 高架鉄道橋の騒音レベルマップ¹³⁾

2. 3 環境問題と人体への影響

2. 3. 1 環境中の騒音

公害対策基本法によると、公害とは「事業活動その他の人の活動に伴って生ずる相当範囲にわたっての人の健康、または生活環境にかかる被害を生じるもの」と定義されており、“公害騒音”は「不快な（やかましい）音」と解釈されている。すなわち休養や安眠を妨害するような音、勉強や仕事の能率を妨害する音、会話や電話などの日常生活を阻害する音、さらには生理的、心理的な障害を引き起こすような音がこれにあたると考えられる。また騒音には交通騒音を始めとして、航空機騒音、工場騒音、建設作業騒音、近隣生活騒音などがある。

騒音の大きさの目安として、身近にある一般的な騒音の例を表-2.3.1に示す。我々が日常的に曝されている騒音レベルは、平均的な事務所内で約50~60dB(A)、街頭で約60~75dB(A)、地下鉄の車内のように騒音の激しい所で80dB(A)程度である。生活環境における騒音の1日の変化は図-2.3.1のように例示される。

表-2.3.1 身近にある騒音の例¹⁾

(音源)	騒音レベル [dB(A)]	(場所)
ニューマチック (ハンマ) チツパ	130	飛行機離着陸直下
	120	
製缶 鍛造機	110	ガード下
	100	
コンプレッサ	90	地下鉄電車内 バス車内
のこ盤 グラインダ	80	
	ボール盤 塗装機	
騒々しい街頭	70	静かな街頭
	60	
普通の会話	60	平均的な事務所内
	50	静かな住宅地の昼
	40	静かな住宅地の夜
	30	静かな住宅地の夜

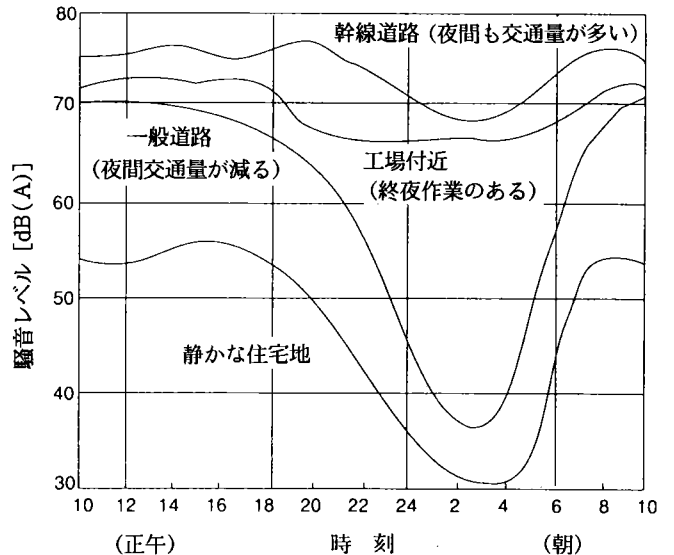


図-2.3.1 騒音の1日の変動例¹⁾

交通騒音は、一般道路の沿線では昼間に相当の騒音があっても夜間には交通量が減って静穏な状態になる反面、幹線道路では夜間でも交通量が多いため昼間の騒音レベルからあまり減少しないことが大きな問題である。

昭和54年に環境庁が道路交通公害（騒音、振動、大気汚染等）について行った調査によると、被害を受けたと考えている人は80%を越えており、特に道路に隣接する住民にその割合が高い。これ以降も我が国の自動車保有台数は増え続けており、被害状況はさらに悪化していると考えられ

る。橋梁騒音も当然これら道路交通公害のひとつとして位置づけられるが、以下に橋梁と関係が深い道路交通騒音と低周波空気振動について公害という面から取り上げ、その特徴を述べ前節の内容の補足とする。

2. 3. 2 道路交通騒音

(1) 騒音の推定式

従来から道路交通騒音の推定式として種々のものが提案されている。ここでは代表的なものとして日本音響学会騒音委員会、および日本道路協会・道路環境整備マニュアルによる推定式を紹介する¹⁴⁾。

$$L_{50} = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} l + 10 \log_{10} \left(\pi \frac{1}{d} \tanh 2\pi \frac{1}{d} \right) + \alpha_d + \Sigma \alpha_i \quad (2.3.1)$$

$$L_{WA} = 87 + 0.2V + 10 \log_{10} (a_1 + 10a_2) \quad (2.3.2)$$

ただし、

L_{50} : 騒音レベルの中央値 [dB(A)]

L_{WA} : 1台の車から発生する平均パワーレベル [dB(A)]

V : 平均走行速度 [km/h]

l : 音源から受音点までの距離 [m]

d : 平均車頭間隔 [m] $d = 1000V/N$

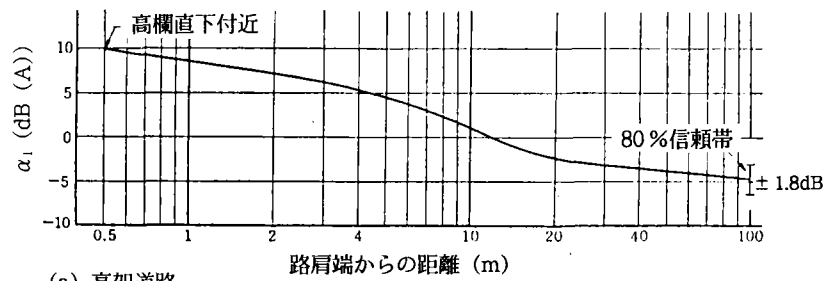
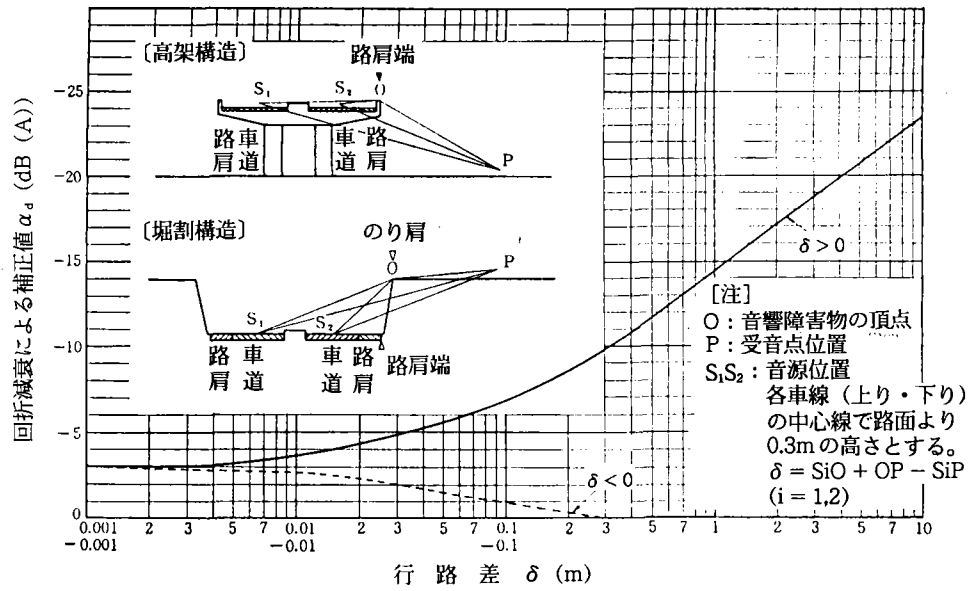
N : 平均時間交通量 [台/h]

a_1 : 小型車混入率

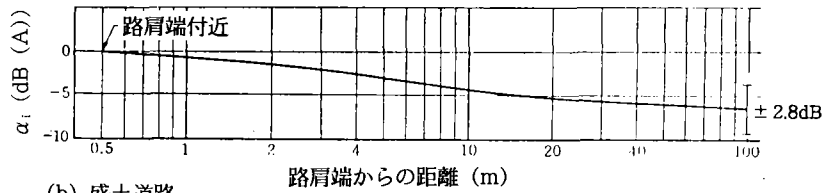
a_2 : 大型車混入率 $a_1 + a_2 = 1.0$

α_d : 回折減衰による補正值 [dB(A)] (図-2.3.2による)

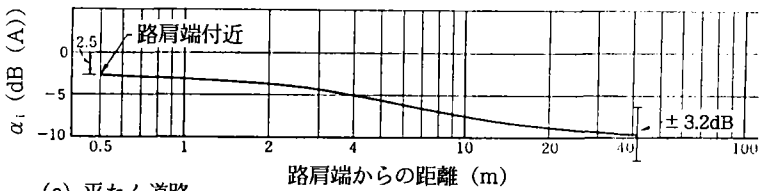
α_i : 種々の原因による補正值 [dB(A)] (図-2.3.2による)



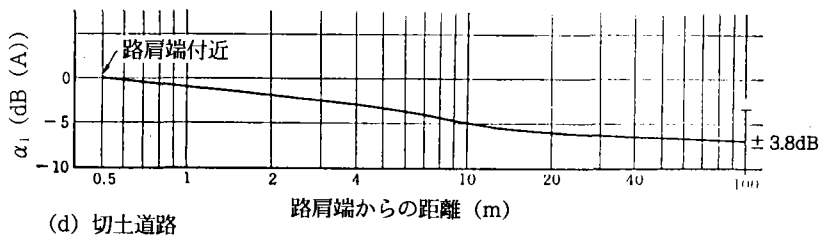
(a) 高架道路



(b) 盛土道路



(c) 平たん道路



(d) 切土道路

図 - 2.3.2 騒音推定式の補正值の計算図表⁴⁾

(2) 騒音レベルに影響する各種要因

交通騒音レベルは基本的に交通量によって定まるが、式 (2.3.1) から明かなように車種、走行速度、音源からの距離および地形にも影響される。

【車種の影響】 自動車はその車種によって騒音レベルが著しく異なる。表-2.3.2は車種別の騒音レベルであるが、普通乗用車と大型車の間には約10dBもの差があり、大型車1台の騒音は乗用車の10台分に相当する (式 (2.1.6) 参照)。特に騒音の大きい大型車ではその差は15dB以上で、乗用車30台分の騒音レベルとなっている。

表-2.3.2 自動車種別走行音レベル

車種	騒音レベル [dB (A)]
大型トラック 大型バス	79 ~ 84
小型トラック	73 ~ 78
普通乗用車	70 ~ 75
二輪車	72 ~ 77

【走行速度の影響】 走行速度が速くなると騒音レベルが大きくなる。図-2.3.3は3径間連続トラス橋 (59.1 + 98.5 + 59.1m) での実測例であるが、速度が2倍になると音圧レベルは6dB程度増加している。また一定速度の場合に比べ速度が変化する (加速度を生じる) 場合の方が騒音が大きくなる。これにはエンジン音が騒音レベルのかなりの部分を占めることが関係しており、信号のある所で発進時のエンジンのふかしによる騒音が問題となることと同様である。

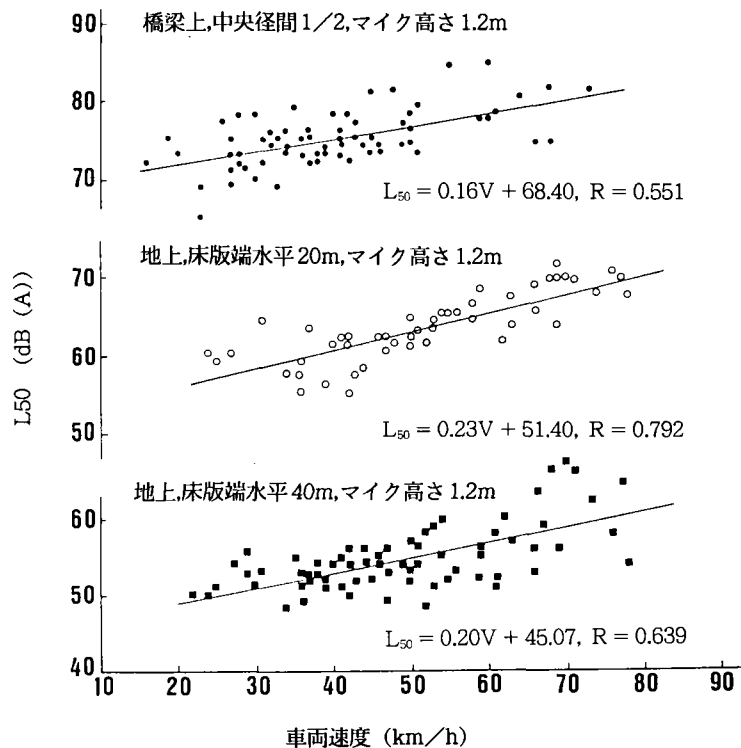


図-2.3.3 走行速度の影響

【地形の影響】 道路からの距離減衰については、開放地であっても地形との関係で騒音レベルは大幅に変化する(図-2.3.4)。盛土で一度騒音レベルが下がるのは、路肩が音源に対して遮へい物の役割をするからである。盛土は高いほど伝播距離はのびる傾向があり、深い切取りは音を急激に減衰させる。高架橋の場合、高さ1m内外のコンクリート壁高欄を持つものも多く、これがあると盛土でも見られるように道路に近い所で騒音レベルがやや小さくなる。

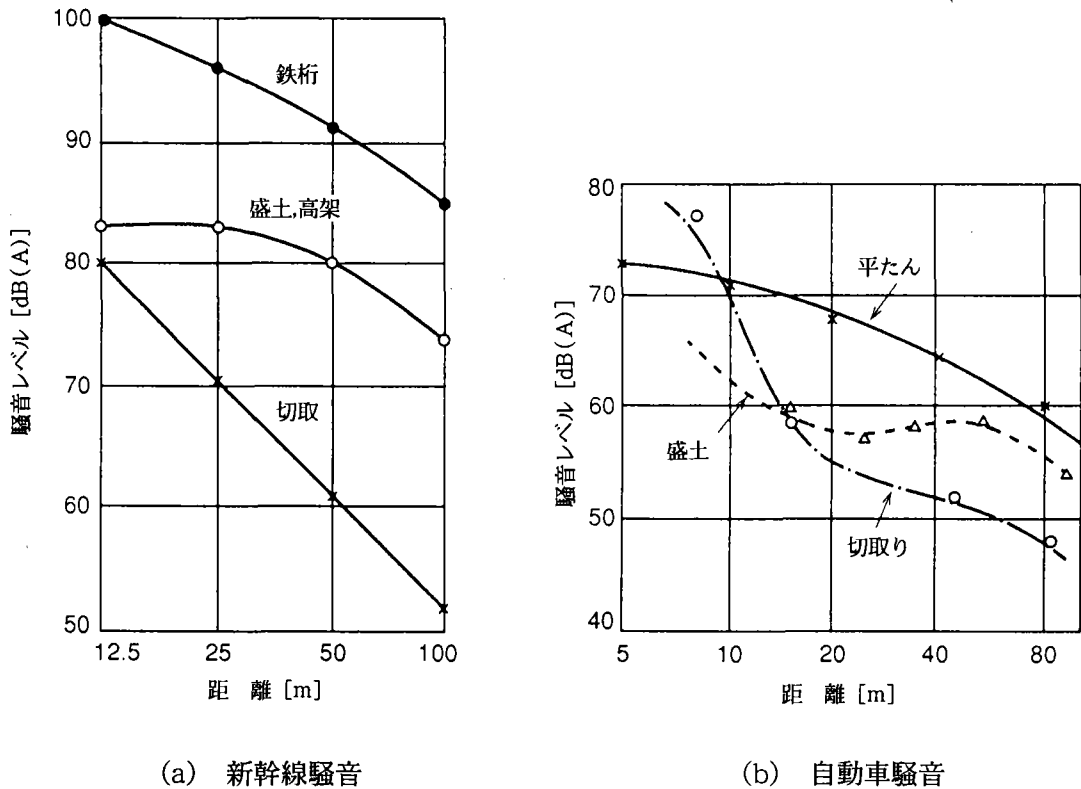


図-2.3.4 地形の影響

(3) 環境基準

交通騒音の被害は騒音レベルだけでなく、受ける側の状況によっても程度に違いが出る。そのため環境基準では、地域の類型、地域区分および時間区分によって表-2.3.3のように騒音レベルの上限を定めている。地域の類型は、療養施設が集合して設置される地域など特に静隠を要する地域がAA、一般の住宅地域がA、商業、工業地域がBにあてはめられているが、都市計画法に定める工業専用地域は対象となっていない。

文献15)では、等価騒音レベル L_{eq} (第3章参照)と表-2.3.4~6を用いて、騒音に対する公の反応を予測する方法を示している。これによれば、例えば主要道路にある商住地域で L_{eq} が70dB(A)であったとすれば、表-2.3.4から昼間、屋外で50~60dB(A)となるので、70-(50~60)=10~20dB(A)だけ基準値を越えることになり、表-2.3.5から公の反応は強大ということになる。

表-2.3.3 環境基準（一般）

地域の類型	時間の区分			該当地域
	昼間	朝夕	夜間	
AA	45	40	35	都道府県知事が指定
A	50	45	40	
B	60	55	50	

表-2.3.4 種々の地域の騒音基準（屋外）¹⁵⁾

地 域	基準値 dB (A)
田園住宅地、病院、休養地域	35~45 (25~35)
郊外住宅地、道路交通のほとんどないところ	40~50 (30~40)
都市住宅地	45~55 (35~45)
工場、商店、主要道路のある商住地域	50~60 (40~50)
市街地（商・貿易・官庁街）	55~65 (45~55)
工場地域（重工業）	60~70 (50~60)

注：括弧内は夜間の値

表-2.3.5 騒音に対する公の反応¹⁵⁾

騒音基準をこえる値 dB (A)	予想される公の反応
0	なし 反応なし ~ 散発的苦情
5	少し 散発的苦情 ~ 広範な苦情
10	中位 散発的苦情、広範な苦情 ~ 地域社会活動のきざし
15	強大 広範な苦情 ~ 地域社会活動のきざし
20	最強 地域社会活動のきざし ~ 強力な地域社会活動

表-2.3.6 屋内騒音を得るための屋外基準に対する補正值¹⁵⁾

窓の状態	補正值 dB (A)
窓を開く	- 10
一重窓を閉じる	- 15
二重窓を閉じるあるいは二重閉切窓	- 20

2. 3. 3 低周波空気振動

低周波空気振動というはまだ幾分耳慣れない言葉であるが、例えば航空機が頭上を飛んでいるときガラス戸がビリビリ震えたり、寺の堂内で鐘が低い音で叩かれたとき離れた位置にあるローソクの火が風もないのに揺れるなど、比較的身近なところでも数多く見受けられる現象である。低周波空気振動による苦情や被害は、その周波数が100Hz以下かつ音圧レベルが75~80dB以上になった場合に発生していることが多く、その影響は建具や家屋に対するものと人体に対するものに分けられる。

(1) 建具や家屋への影響

低周波空気振動は、疎密波の伝播によってガラス窓、戸障子、家具等を振動させガタガタという2次騒音を発生させる。図-2.3.5に示すように建具からの2次騒音は音圧レベルが約75dBを越えると発生している。また家屋の固有振動数が低周波空気振動の周波数に比較的近い場合、家屋が共振振動を起こして瓦がずれたり壁やタイルが落下するなどの被害が起こることがある。

(2) 人体への影響

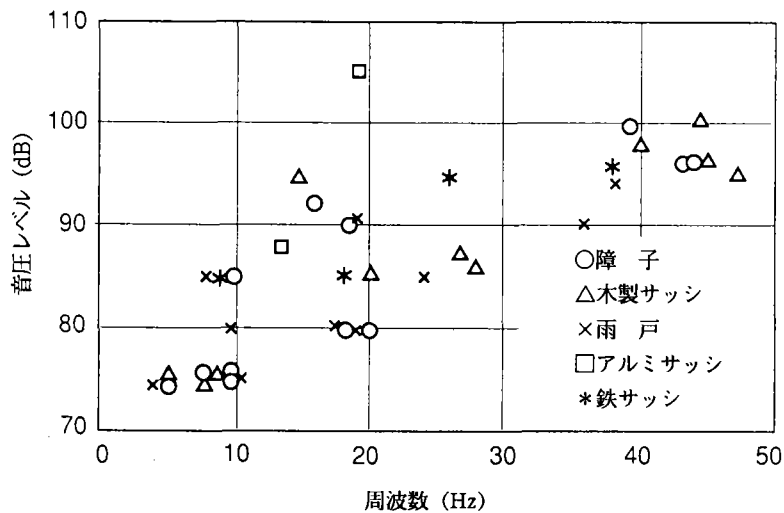


図-2.3.5 低周波音と2次音発生の関係 (ガタつきの始まるレベル)

昭和63年12月、西名阪自動車道香芝高架橋の低周波公害訴訟に和解が成立した。おもな和解の条件は緩衝帯の設置などであるが、最大の争点であった低周波空気振動と健康との因果関係について触れられていない。低周波空気振動の人体に対する影響は、まだ学問的に明らかにされておらず取扱いが難しい問題である。

低周波空気振動に対する苦情の種類は以下の3つがある。

- ① 聴覚的なもの … 耳鳴り、耳の圧迫
- ② 心理的なもの … 睡眠妨害、読書・考えごとの妨害、いらいら感
- ③ 生理的なもの … 身体への圧迫感、吐き気、頭痛、高血圧、動悸

これら人体への影響は個人差や生活条件によって度合が異なるとされており、例えば健全な人と敏感な人では、いき値に図-2.3.6のような差が認められている。敏感な人は70dBを越えると低周波空気振動を感知するようであり、一般的には女性の方が敏感で特に中年女性が敏感であるという調査報告もある。また苦情は家に始終いる人に集中しており、外で勤務する人からの苦情は少ない。これは低周波空気振動を発生する工場等の労働者は8時間労働であるのに対して、住民は病弱者、老人、子供などを含めて24時間低周波空気振動の中で生活していることによると考えられている（暴露の連続性）。

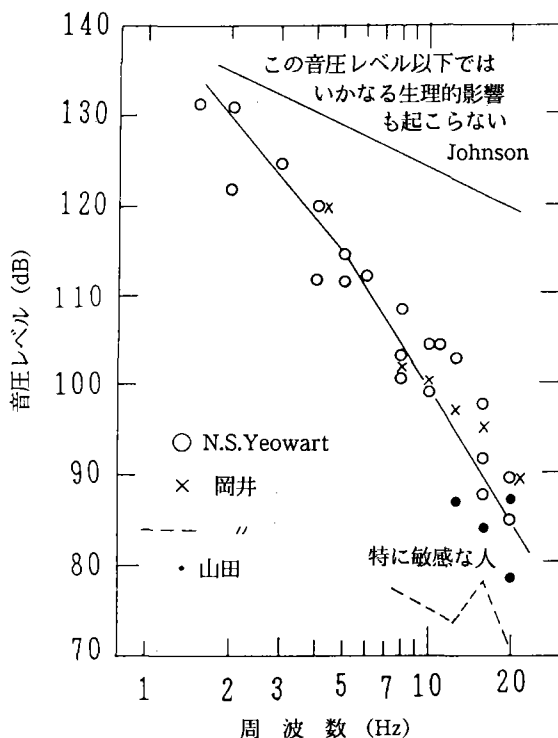


図-2.3.6 低周波音に対するいき値

このほか低周波空気振動については、

- ① 夜間など静かな状況において苦情が多い。
- ② 居住空間が狭いと被害感が増大する。
- ③ テレビやラジオを聞くことによって被害感が軽減する。
- ④ 精神の緊張の度合いによって被害感が異なる。
- ⑤ 実験の被験者と苦痛を訴える住民では心身の状態が異なる。

などと言われているが、今のところ“感覚閾（いき）値”以外に人体への影響を表わす定量的な数値はない。低周波空気振動を人間が感じとる限界値としての閾値は、結果がほぼ一致する多くの実験により得られた値であるが、いずれも短期間の高音圧レベルでの実験によって得られたものであり、環境問題を論じるときにはさらに長期間の低音圧レベルでの影響も検討せねばならない。このようなことからこの問題が決着するにはまだ多くの研究が必要と考えられる。

第2章の参考文献

- 1) 守田栄：新版 騒音と騒音防止，オーム社，昭和36年
- 2) 加藤正義：騒音振動測定の基礎知識と評価方法，鉄道土木，Vol. 23, No.12, 1982 - 12
- 3) 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック，技報堂，昭和41年
- 4) 日本建築学会：実務的騒音対策指針，技報堂，昭和50年
- 5) 斎木三郎・毛戸秀幸：高速道路における低周波音の実態とその対策，公害と対策，Vol.14, No.2
- 6) 足立義雄：橋梁の振動性状が低周波域の空気振動に及ぼす影響に関する研究，土木研究所報告，No.164 - 1, 1984 - 11
- 7) 大島俊之・能町純男・月田良義・三上修一：はり理論による低周波空気振動の放射音圧レベルの解析，土木学会論文集，No.356/I - 3, 1985 - 4
- 8) 五郎丸英博・白石捷夫・原公・小森武：中小支間道路橋における低周波空気振動の放射音圧レベルとスペクトルの推定，土木学会論文集，No.403/IV - 10, 1989 - 3
- 9) 谷口紀久・羽根良雄・菅原則之：鋼橋の騒音防止，構造物設計資料，No.38, 1974 - 6
- 10) 阿部英彦：鉄橋の騒音対策，土木学会誌，1978 - 3
- 11) 田矢晃一・清水進：道路橋より発生する低周波ジョイント音の発生メカニズムについて，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，1 - 2 - 10, p103, 1977 - 11
- 12) 松井昌幸：騒音防止技術と施工実例資料集，フジテクノシステム出版部，昭和49年
- 13) 渡辺義則・角知憲・宮木康幸：都市鉄道の伝播モデル，土木学会論文報告集，No.328, 1982 - 12
- 14) 日本道路協会：道路環境整備マニュアル
- 15) 中野有朋：騒音対策（付公害振動資料），情報企画センター