

19. 環境音響・騒音

19.1 波動伝播と音源

19.1.1 波動伝播の簡易モデル

電気系には電圧と電流、機械系には力と速度があるように、音響系にも音圧と粒子速度という2つの基本量がある。音圧の単位はパスカル (Pa、N/m²) であり、単位面積に加わる力である。±1 Pa は水位がほぼ±0.1mm 変化するときを生じる圧力変化である。粒子速度はそれに伴う空気粒子の振動である。波動の伝播は図1の質量とばねが繋がった系を考えると分かりやすい。左端の質量を左右に動かすとばねが伸縮し隣の質量を動かす。このようにして波動が伝わる。音圧はばねを圧縮する (=質量を動かす) 力でありスカラー量である。粒子速度は質量の動きに対応する方向性を持ったベクトル量であり、その単位は m/s である。

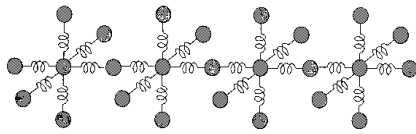


図1 音波伝播のモデル

19.1.2 波動方程式

音源を含まない3次元空間内の点 w での波動方程式は

$$\nabla^2 p(w,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(w,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

で表される。ここで、 ∇^2 はラプラシアン、 $p(w,t)$ は音圧、 t は時間、 c は音速である[1]。

粒子速度 $v_x(w,t)$ と音圧の関係は次式で与えられる。

$$v_x(w,t) = (-1/\rho) \int_{-\infty}^t \frac{\partial p(w,t')}{\partial x} dt' \quad (2)$$

ここで、 $v_x(w,t)$ は x 方向の粒子速度である。音圧の時間変化を $p(w,t) = P(w)e^{j\omega t}$ で表すと (ω は角周波数)、式(1)は次式で表すことができる。

$$(\nabla^2 + k^2)P(w) = 0 \quad (3)$$

ここで、 k は波数であり、 $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ の関係がある (λ は波長)。式(3)に対応する粒子速度は次式で与えられる。

$$V_x(w) = (-1/j\omega\rho) \frac{\partial P(w)}{\partial x} \quad (4)$$

電圧と電流を掛けると電力が得られるように、単位面積 (m²) を通過する単位時間 (sec) あたりの音響エネルギー (音響パワー) は音圧と粒子速度の積の時間平均で与えられ、(有効) 音響インテンシティと呼ばれる。複素振幅を使うと、 x 方向の音響インテンシティは次式で与えられる。

$$I_x(w) = \text{Re}[P^*(w)V_x(w)/2] \quad (4)$$

ここで、 $\text{Re}[\]$ は実数部を意味する。

19.1.3 平面進行波

直交座標系(x,y,z)の x 方向のみに伝播する 1 次元の平面波の場合、式(3)は

$$\left(\frac{d^2}{dx^2} + k^2\right)P(x) = 0 \quad (5)$$

となり、その解は

$$P(x) = (P_1 e^{-kx} + P_2 e^{+kx}) \quad (6)$$

であり、x の正の方向に伝播する音波のみを考えると

$$P(x) = P_1 e^{-kx} \quad (7)$$

となる。粒子速度は式(4)から

$$V_x(x) = (1/\rho c)P_1 e^{-kx} \quad (8)$$

で与えられる。時間を含めて実関数で表現すると、音圧と粒子速度は

$$\begin{aligned} p(x,t) &= P_0 \cos(2\pi ft - 2\pi x/\lambda + \theta_0) \\ &= P_0 \cos(\omega t - kx + \theta_0) \end{aligned} \quad (9)$$

および

$$v(x,t) = (P_0 / \rho c) \cos(2\pi ft - kx + \theta_0) \quad (10)$$

で表される。ここで、 θ_0 は P_1 の位相成分であり、初期 ($t = x = 0$ での) 位相と呼ばれる。初期位相がゼロのときの 100Hz の音波の伝播の様子を図 2 に示す。波面の先端は音速 c (この例では 10ms で 3.43m) 進む。音速とは、図 1 のモデルで左端の質量に衝撃を加えたときの衝撃の伝播する早さに対応するものであり、図 1 における質量が前後に振動する速度に対応する粒子速度とは全く異なる。

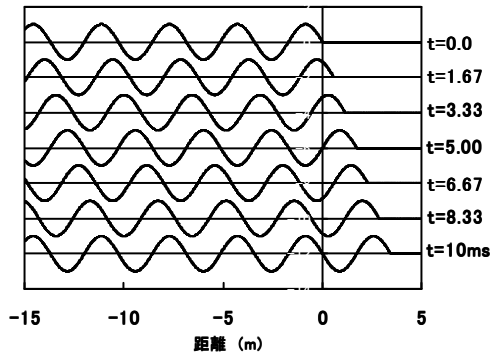


図 2 音波伝播の様子

式(9)で表される反射を含まない平面進行波の特徴は音圧対粒子速度の比が純抵抗 ρc (空気密度と音速の積) で与えられることである。一般に、振幅 P_0 の音圧と振幅 V_0 の粒子速度が位相差 θ を持つ場合の音響インテンシティは式(4)から次式で与えられる。

$$I_a = P_0 V_0 (\cos \theta) / 2 \quad (11)$$

平面進行波の場合、 $P_0 = \rho c V_0$ であるから音響インテンシティは

$$I_a = P_0^2 / (2\rho c) \quad (12)$$

で与えられる。音圧と粒子速度の位相差がないということは、音圧が最大（最小）になるときは粒子速度も最大（最小）になることである。

図 3 に示すように無限大の床に平面波が入射する場合には音圧は次式で表される[2]。

$$\begin{aligned} p(x, y, t) &= P_0 [\cos(2\pi ft - kx \sin \phi + ky \cos \phi) + \cos(2\pi ft - kx \sin \phi - ky \cos \phi)] \\ &= 2P_0 \cos(2\pi ft - kx \sin \phi) \cos(ky \cos \phi) \end{aligned} \quad (13)$$

この時の x および y 方向の粒子速度は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} v_x(x, y, t) &= (2P_0 / \rho c) \cos(2\pi ft - kx \sin \phi) \times \sin \phi \cos(ky \cos \phi) \\ v_y(x, y, t) &= (2P_0 / \rho c) \sin(2\pi ft - kx \sin \phi) \times \cos \phi \sin(ky \cos \phi) \end{aligned} \quad (14)$$

x 方向の音響インテンシティは次式で与えられ、 y 方向のインテンシティはゼロである。

$$I_x = (2P_0^2 / \rho c) \sin \phi \cos^2(ky \cos \phi) \quad (15)$$

図 4 に音圧（左列）、粒子速度（中央）、および音響インテンシティ（右列）が床面からの距離によってどのように変化するかの概略の様子を示す。2次元以上の音場の場合、粒子速度は一般的には楕円回転をする。

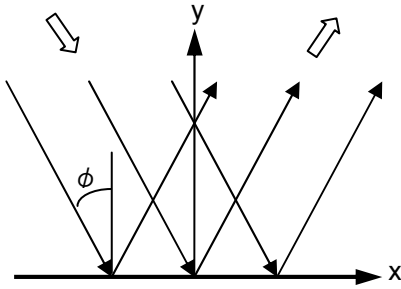


図 3 床面に入反射する 2 次元平面波

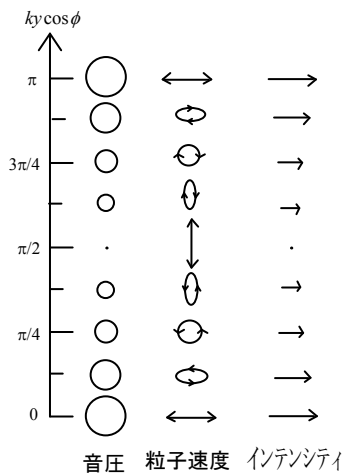


図 4 入反射 2 次元平面波の音圧、粒子速度および音響インテンシティ

19.1.3 球音源

図 5 に示す球体で呼吸振動する音源からの音響放射は ∇^2 を極座標系 (r, θ, ϕ) で表し、 θ および ϕ に依存しないものとする、

$$(r^2 \frac{d^2}{dr^2} + 2r \frac{d}{dr} + (kr)^2)P(r) = 0 \quad (16)$$

となる。この解は第 1, 2 種の 0 次の球ハンケル関数で与えられるが、2 つの解のうち音源から遠ざかる波は第 2 種の球ハンケル関数を用いて

$$P(r) = P_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (17)$$

で与えられる。ただし、初期位相は 0 とした。このときの粒子速度は

$$V(r) = P_0 \frac{1 + jkr}{j\rho ck} \frac{1}{r^2} e^{-jkr} \quad (18)$$

で与えられる。平面進行波の場合と異なる点は音圧の振幅が音源からの距離 r に反比例することである（倍距離・6dB の減衰特性を持つ）。また、 $kr \gg 1$ が満たされない領域では、音圧と粒子速度は位相差を持つようになり、 $kr \ll 1$ では粒子速度が音圧に対して 90 度遅れる。

音源としては振動する表面の速度を与えるほうが現実的である。球の半径を a として表面が V_0 で振動するものとする、

$$V(r) = V_0 \frac{1 + jkr}{1 + jka} \left(\frac{ka}{kr}\right)^2 e^{-jk(r-a)} \quad (19)$$

$$P(r) = \rho c V_0 \frac{jka}{1 + jka} \left(\frac{ka}{kr}\right) e^{-jk(r-a)} \quad (20)$$

$ka \ll 1$ の場合には、音圧は

$$P(r) = j\omega\rho c \frac{Q}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (21)$$

となる。ここで、 $Q = 4\pi a^2 V_0$ は音源の体積速度（面積×振動速度）である。

任意の半径における音圧と粒子速度の比（音響インピーダンス密度）は

$$z_a(r) = \rho c \left[\frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} + j \frac{(kr)}{1 + (kr)^2} \right] \quad (22)$$

で与えられる。 $kr \gg 1$ の場合は $z_a(r) = \rho c$ となり、平面進行波の場合と同じ音圧と粒子速度の関係が成り立つ。 $r = a$ のときの放射インピーダンス密度の実数成分（右辺第 1 項）のみがエネルギーの放射に寄与し、放射パワーは次式で与えられる。

$$W = 4\pi a^2 \rho c \frac{(ka)^2}{1 + (ka)^2} \frac{V_0^2}{2} = 4\pi a^2 \rho c \frac{|P|^2}{2} \quad (23)$$

式(23)の放射パワーと音圧の関係は任意の半径において成り立ち、音響インテンシティは平面進行波の式(12)と同じ形で与えられる。

呼吸振動する微小球音源はモノポールと呼ばれる。また、近接する逆位相の2つのモノポールからなる音源をダイポールとよぶ。

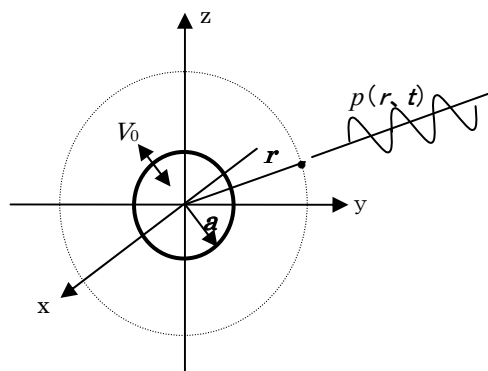


図5 呼吸振動する球音源

19.1.4 円筒音源

十分長い直線状の円筒が半径方向に膨張圧縮して振動する場合には、円筒の軸方向のエネルギーの流れはないので、2次元平面上(r, θ)の r 方向への広がりのみを考えればよい。半径が r_1 および r_2 で幅面 Δz の円形の帯を考える。点音源の場合と同様、音圧と粒子速度の比が ρc で与えられるという平面波近似を仮定すると、2つの帯を通過するエネルギーは等しいので、 $[P_1^2/(2\rho c)]\Delta z 2\pi r_1 = [P_2^2/(2\rho c)]\Delta z 2\pi r_2$ が成立し、 $P_2/P_1 = \sqrt{r_1/r_2}$ が成り立つ。すなわち、音圧は半径の1/2乗に反比例することになる($P \propto r^{-1/2}$)。距離が2倍になれば、音圧は $\sqrt{1/2}$ であるから、デシベルの低下量は $10 \log_{10}(\sqrt{1/2})^2 = 3$ (dB)である。線音源は「倍距離 - 3dB」の距離特性を有する。

平坦な土地にある直線道路では道路からの距離による長時間平均の音圧は「倍距離 - 3dB」の傾向を示すと言われている。

19.1.5 有限面音源

より現実的な音源として、図6に示す無限大バツフル(剛壁)に取り付けられた有限平面音源からの音響放射について検討する。この場合は 2π 空間の任意の点における音圧は次式のRayleigh積分を適用して求めることができる。

$$P(r) = \int_S j\omega\rho c \frac{V(x,y)}{2\pi r_{ij}} e^{-jkr_{ij}} dx dy \quad (24)$$

ここで、 $V(x,y)$ は音源面の速度分布、 r_{ij} は微小音源面 $dx dy$ と観測点の距離である。空間内の任意の点での音圧の計算手順は

- 1) 音源面を微小面積(ΔS)に細分化する。
- 2) 各微小面の振動速度 V_{ij} から体積速度($Q_{ij} = \Delta S V_{ij}$)を求める。
- 3) Rayleighの積分を次式で近似し、観測点(x,y,z)での音圧を計算する。

$$P(x, y, z) = \sum_i^M \sum_j^N j\omega\rho c \frac{Q_{ij}}{2\pi r_{ij}} e^{-jk r_{ij}} \quad (25)$$

具体的平面音源として、寸法が幅 0.3m、高さ 0.21m、厚み 5mm の単純支持のあるアルミニウム矩形板について検討する。ヤング率： $7.1 \times 10^{10} \text{Pa}$ 、密度： $2,700 \text{kg/m}^3$ 、ポアソン比：0.25 を仮定すると、固有振動数は、(1,1)モード：405.7Hz、(2,1)モード：806Hz、(1,2)モード：1,222Hz、(3,1)モード：1,473Hz、(2,2)モード：1,623Hz、および(3,2)モード：2,290Hz となる。ここで、 (m,n) モードとはそれぞれ、長手方向に m 個、および短手方向に n 個の腹を有するモードである。各モードの振動速度分布は、次式で与えられるものとする。

$$V(x, y) = \frac{1}{j\omega} \sin\left(\frac{m\pi x}{0.3}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{0.21}\right) \quad (26)$$

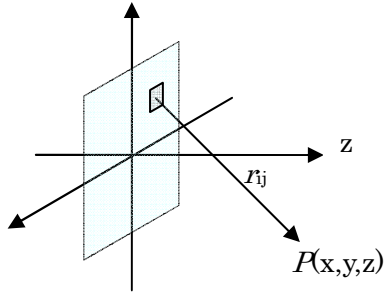


図 6 無限大バツフル中の矩形版

図 6 の音源の中心軸（ z 軸）上での距離による音圧変化を図 7 に示す。 $d < 0.21/\pi$ が面音源（減衰無し）、 $(0.21/\pi) \leq d \leq (0.3/\pi)$ が線音源領域（倍距離-3dB 減衰）、 $(0.3/\pi) \leq d$ が点音源領域（倍距離-6dB）と言われているが[3]、振動モードを考慮すると多少異なる距離減衰特性を持つ。

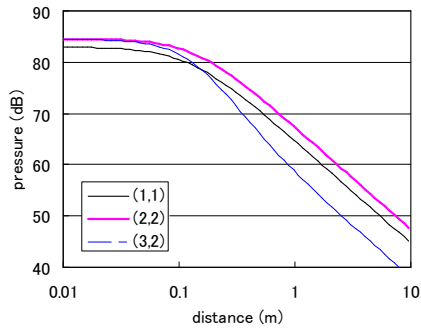


図 7 幅 0.3m、高さ 0.21m の矩形板の (1,1)、(2,2)、および(3,2)モードの距離減衰特性

図 8 はモードごとの放射効率が周波数によりどのように変化するかを示したものである。放射効率とは音源面のどの点をとっても放射抵抗が ρc を持つと仮定したときの放射パワーに対する、

実際の放射パワーの比であり、次式で与えられる。

$$\sigma = W / (\rho c S \langle V^2 \rangle / 2) \quad (27)$$

ここで、 $\langle V^2 \rangle$ は速度振幅の二乗平均値である。横軸は板幅の半分を $a(=0.15)$ として正規化周波数 ka で表している。全体として、 $ka \ll 1$ の領域で3つの傾向がある。(1,1)モードはモノポールのような音響放射となるため、6dB/oct の傾斜を持つ。(3,1)モードも同様である。(2,1)および(1,2)モードはダイポールに対応し、12dB/oct の傾斜を持つ。さらに、(2,2)モードはクワドラポールに対応し、18dB/oct の傾斜を有する。高域では全ての場合に ρc のインピーダンスに収束する。板の振動速度の二乗平均値 $\langle V^2 \rangle$ は共振周波数において大きくなる。その周波数が図8のどの位置にあるかによって放射パワーが決められる。板の形状や厚さを決める上で放射効率は重要なファクターである。

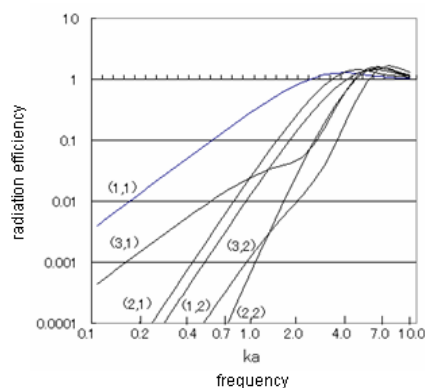


図8 矩形板の各モードの放射効率

19.2 音響測定

19.2.1 音圧、音圧レベル、騒音レベル

最も基本的な測定項目は音圧である。ほぼ $1,013\text{hPa}$ の大気圧に重畳された交流的な圧力変動成分が音圧であり、それを測定するためにマイクロホンが用いられる。計測用マイクロホンとしては、図 9 に示すコンデンサマイクロホンが一般に用いられる。その概略構造を図 10 に示す。音圧によって膜面に力が加わると背電極との距離が変わり、コンデンサとしての容量が変化し、交流電圧がプリアンプ回路を通じて出力される。計測用には通常、1、1/2、および 1/4 インチの直径のマイクロホンが用いられ、高域の限界はほぼ 10kHz 、 20kHz 、および 100kHz となっている。マイクロホンの感度 (1Pa 加わったときの出力電圧、 V/Pa) の校正は相互校正法という原理に基づき極めて精度良く行うことができる[4, 5]。

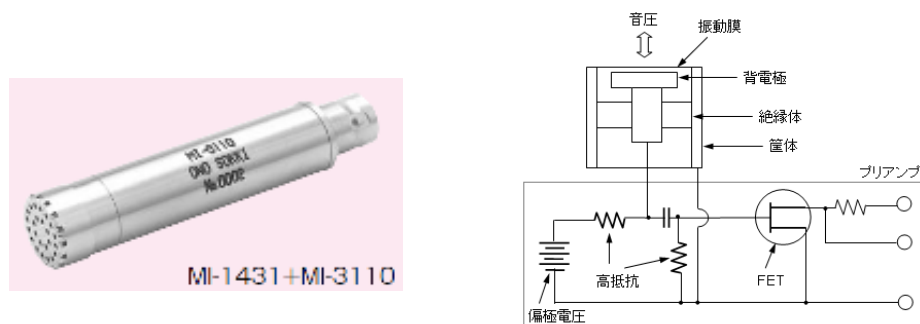


図 9 小野測器製 1/2 インチマイクロホン+プリアンプの概観（左、小野測器 HP より引用）および概略回路構成（右）

音圧レベルとは音圧の基準値である $20\mu\text{Pa}$ に対する比をデシベル (dB) で表したものである。

$$L_p = 10 \log_{10} [P / (20 \times 10^{-6})]^2 \quad (28)$$

デシベルはパワーの比を表すものであるので、音圧を 2 乗して対数をとっている。0dB である $20 \times 10^{-6} \text{Pa}$ は人が聞き取れる限界に近く、感度がよい 1 インチマイクロホンを用いて測定できるかどうかの限界のレベルである。120dB に対応する 20Pa はほぼ人間の聴覚が耐えられる限界に近い。

騒音レベルとは、規格で決められた周波数補正特性 A を通して測定した騒音計の指示値であり、聴感特性を考慮した音の大きさに対応する物理量である。単位記号としてはデシベル (dB) を用いる。

19.2.2 音響インテンシティ

音響インテンシティ（強度）を求めるには、音圧とともに粒子速度を求める必要がある。一般には、計測方向に配置した近接（距離 d ）する 2 つのマイクロホンの出力 P_1 、 P_2 に式(4)の差分近似を適用して求める。

$$V_x(w) = (-1/j\omega\rho)(P_1 - P_2)/d \quad (28)$$

音圧は平均値

$$P(w) = (P_1 + P_2) / 2 \quad (29)$$

を用いる。両式を式(9)に当てはめると音響インテンシティは

$$I_x(w) = -\text{Im}[P_1^* P_2] / \omega \rho d \quad (30)$$

で与えられる。 $P_1^* P_2$ は P_1 と P_2 のクロスパワースペクトルであり、 $\text{Im}[\]$ はその虚数部を表す。音響インテンシティはベクトル量なので、音響エネルギーの流れの方向を知るには、3 軸成分を測定する必要がある。図 10 に示す 3 軸型インテンシティプローブを用いると 3 軸同時計測が可能となる。

音響インテンシティ計測の利用は主に 2 つある。1 つはエネルギー流による音場の可視化である。音場を可視化することにより音源探査が可能になる。もう 1 つは音源からの放射パワーの計測である。後者については ISO や JIS により詳細な測定法が決められている。

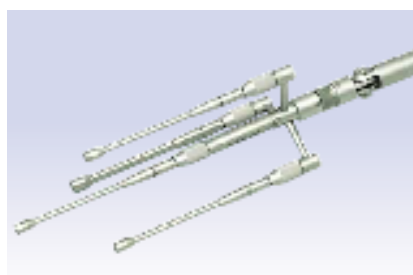


図 10 3 軸音響インテンシティプローブの例（小野測器 HP より引用）

19.2.3 計測環境

騒音の評価には外部の騒音の影響を極力少なくする必要がある。また、測定環境により結果が異なる場合もあるので、より厳密な音響計測には目的に応じて、無響室、半無響室、残響室が用いられる。

図 11 に無響室（左）、半無響室（中央）、および残響室（右）の例を示す。

無響室：室内の 6 壁面がすべて吸音面となっており、マイクロホンの校正やスピーカの周波数応答特性などを測定するときに使用される。機械騒音の測定にも使用可能であるが、下方への音の測定が面倒なので通常は使われない。

半無響室：床面のみが完全反射性となっている。機械騒音の騒音レベルや音響パワーの計測によく用いられる。部屋の吸音の性能は逆二乗特性（「倍距離・6dB」）がどの程度満たされるかで評価する。

残響室：音波が種々の方向から到来する拡散音場を作りため、すべての壁面を反射性に行っている。材料のランダム入射吸音率の測定や遮音材料の遮音特性の測定に用いられる。

これらの計測環境はいわば理想に近い環境であるが、設置には大きなコストがかかる。測定対象の機器には小さなものも多く、簡易無響箱や残響箱でも十分精度のよい計測が可能である。



図 11 無響室（左）、半無響室（中央）、残響室（右）の例（(株) 小野測器 HP より引用）

19.3 騒音対策と評価

19.3.1 騒音対策

機器の騒音発生メカニズムは多岐に渡るものであり、その制御・対策はさらに複雑化する。詳細は文献[3, 6-8]等を参照されたい。ここでは、一般的な考え方を述べるにとどめる。

人工的に発生する騒音のほとんどは物体の振動が原因である。大もとの加振源から人間の耳に到達するまでの各段階でそれぞれ対策方法が考えられる。対策を講じるには解析、計測により発生原因を明確にしたうえで最適な手法を採用する必要がある。表1は加振源、振動系、音響系でどのような解析方法、評価（測定）量、および対策があるかを大まかに示したものである。手法は多岐に渡るため、エンジニアにとっては有効でしかも効率的な手法の選択が重要である。

表1 騒音の発生と対策

	加振源	振動系	音響系
解析 シミュレーション	機能モデル	機能モデル 有限要素法 理論・実験モード解析 統計的エネルギー法	有限・境界要素法 音響インテンシティ法 音響ホログラフィー法 統計的エネルギー法 環境騒音予測
評価量	力 (N) 圧力 (Pa) トルク (Nm)	変位、速度、加速度 駆動点（伝達アドミタンス） 入力パワー (Win) 平均二乗速度<V ² >	音圧 (Pa) 放射パワー (Wa) 変換効率 (Wa/Win) 放射効率 (Wa/ρc<V ² >) 音質
対 策	乱流発生低減 加工精度アップ バランスング	加工精度アップ パッシブ制振 動吸振器 アクティブ振動制御	放射効率の低減 遮音 吸音 アクティブ騒音制御

19.3.2 環境騒音予測

環境影響評価法が全面施行（H11年6月）されてから、道路、鉄道、橋梁建設、廃棄物処理場、発電所、工場建設、都市開発、大規模小売店舗の新設（施設変更）、マンション建設等の事業者は、環境影響評価書を作成し環境庁長官、行政機関の審査を受けることが義務づけられた。そのため、工事前後の騒音レベルの変化量の精度良い推定が極めて重要になって来ている。環境騒音においてもっとも大きな影響を持つ道路交通騒音に関しては、日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会が1998年「ASJModel 1998」を発表した[9]。現在は、道路交通騒音予測だけでなく、工業騒音、鉄道騒音予測、室内騒音予測等に関して各国が予測手法を提案している。それらを網

羅した予測ソフトウェアも市場において販売されている。

図 12 は環境騒音予測ソフトウェアの 1 つである SoundPlan を用いて、高層ビルと防音壁を建設した後にどのような騒音レベルの変化がもたらされるかを予測した例である。

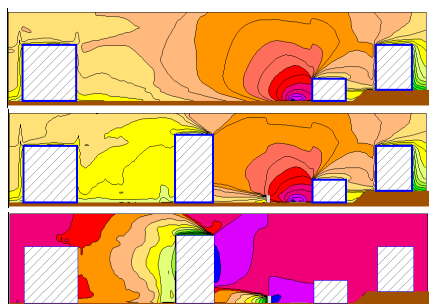


図 12 高層ビルと防音壁の建設前後の環境騒音のシミュレーション結果（上：建設前、中：建設後、下：音圧レベルの差）（(株) 小野測器提供）

19.3.3 音質評価技術

音は機器や人体の診断への利用などの特殊な場合以外は、快適な音であれうるさい音であれ最終的には人間が評価するものである。近年、機器の騒音低減技術が進歩したせいもあり、音量の低減から音質の向上への関心が高まっている。その際の音質評価へのアプローチの仕方には大きく分けて 2 通りある。1 つは現状の騒音量をさらに低減することが困難なため、質を変化させて好まれる音に変えようとする立場、もう 1 つは商品の企画段階から積極的に好まれる音質を作ろうとする立場である[10]。また近年、ハイブリッド車の低騒音性が歩行者に対する安全性の点で問題になり、何らかの警報音を付加する必要に迫られるというような状況も生まれてきている。

音質評価技術に関しては種々の評価指標が確立している。表 1 はその代表的なものを示したものである。音の大きさ（ラウドネス）の評価法は 1930 年代から始まり、70 年代にはほぼ完成している。しかしながら、過渡音に関してはまだ評価手法が確立とはいえない。70 年代には新たに「シャープネス」や「ラフネス」が導入され、80 年代には「変動強度」や「トナーリティ」の評価量が開発されている。種々の評価量と、各評価量についてもいくつかのバリエーションもあるので、対象とする機器の騒音の種類に応じて目的にあった評価量を適用することが重要である。

表 2 各種音質評価量（(株) 小野測器の HP より引用）

心理音響評価量	単 位	解 説
ラウドネス	sone	音の大きさ。定常音については ISO 532B で規格化。
ラウドネスレベル	phone	ラウドネスを対数表示。
シャープネス	acum	甲高さ、低域と高域の音のバランスが高域側に偏ったときに感じる。
ラフネス	asper	粗さ感 ざらざら、ぶるぶる感。ラウドネスが短い周期で変動する時に感じる。
変動強度	vacil	変動感 滑らかさ感の逆。ラウドネスがゆっくりとした周期で変動する時に感じる。
トーンリティ	tu	純音感。音の中にどれだけ純音成分が多く含まれているかを表す。
AI	%	語音明瞭度。語音の明瞭性を評価するための評価量。

文献

- [1] 城戸健一、基礎音響工学、コロナ社。
- [1] Mikio Tohyama, Hideo Suzuki, and Yoichi Ando, *The Nature and Technology of Acoustic Space*, 53-57, Academic Press (1995).
- [3] 公害防止の技術と法規編集委員会編、公害防止の技術と法規（騒音編）、丸善（1995）。
- [4] Allan D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, 140-146, McGraw-Hill (1981).
- [5] 鈴木英男、音響学における相反定理とその応用、日本音響学会誌、58, 4, 239-243 (2002).
- [6] 日本機械学会編、機械騒音ハンドブック、産業図書（1991）。
- [7] 時田保夫監修、音の環境と制御技術 I、II、フジ・テクノシステム（2000）。
- [8] 日本騒音制御工学会編、騒音制御工学ハンドブック I、II、技報堂（2001）。
- [9] 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会、日本音響学会誌、55, 4, 281-324 (1998).
- [10] 吉川公利、「音とブランド力」、騒音制御、31, 3, 186-191(2007).