

機械類の発生音パワーレベルの測定規格*

子 安 勝**
(音響工学研究所)

1. まえがき

各種機械類から発生する騒音のパワーレベルは、

- 1) 騒音予測のための基礎資料、
- 2) 機械自身に適用される防止技術によってえられる騒音低減効果の評価、
- 3) 機械の発注あるいは検収のための性能仕様における騒音許容限度の設定、

など多くの用途をもっている。

欧米諸国では、かなり以前からパワーレベルの実用化が進んでおり、計測方法の規格も整備されている。例えば、ISO (国際標準化機構) では、1970年に騒音源のパワーレベル計測のための基本規格作成作業が始められ、これまでに「騒音源のパワーレベル決定方法」という共通名称をもった一連の規格 (ISO 3740 ~ 3748) が作られており、さらにこれを基礎にして個別機械のパワーレベル計測方法についての規格化が進められている。

こうした国際規格に対応して、欧米の各国内規格やEC規格でも、パワーレベル計測方法が制定されており、わが国からの輸出機械についても、これによって検収が行われる例が多くなっている。一方、わが国では、一部を除いて実務面にパワーレベルが使われることは少なく、規格としてもJIS A 1798 (住宅用設備ユニットの騒音出力の測定方法) が、唯一のものというのが現状である。

ただ初めに述べたような各方面におけるニーズに対応して、今後わが国でもパワーレベル計測の機会が多くなるものと考えられる。そのために、ここでは国際規格を中心にして、パワーレベル計測方法規格の概要を紹介する。

また新しい音響計測技術として、音の強さの計測が各方面で注目されているが、その一つの応用としてパワーレベル計測への適用が考えられている。この方法は、音圧レベルからパワーレベルを算出する方法にくらべていくつかの特徴をもっており、今後

の発展が期待される。すでにISOの場合で、この方法の国際規格作成が非公式の話題に上っている。そのために、音の強さからのパワーレベル算出方法についても、その概要を示しておく。

2. パワーレベル計測方法の基本規格

ISOでは、「騒音源のパワーレベル決定方法」の名称で、以下に示される9種類の基本規格が作られている。

- 3740 - 基本規格の使用と騒音試験規定作成のための指針
- 3741 - 残響室における広帯域騒音源についての精密測定方法
- 3742 - 残響室における純音性および狭帯域騒音源についての精密測定方法
- 3743 - 特殊残響性試験室における工学的測定方法
- 3744 - 反射面上の自由音場条件における工学的測定方法
- 3745 - 無響室・半無響室における精密測定方法
- 3746 - 現場予備調査方法

このなかで、実際の計測方法として重要なのは、規格番号で3741 ~ 3745までの5規格である。表題

表-1 パワーレベル計測ISO規格の比較

規格番号	方法の区分	試験環境	音源寸法の制約	騒音の性状
3741	精密	残響室	室容積の1%以下	定常, 広帯域
3742				定常, 純音性分または狭帯域
3743	工学	特殊試験室		定常, 広帯域, 狭帯域または純音
3744	工学	屋外または大きな室	無制限	無制限
3745	精密	無響室または半無響室	室容積の0.5%以下	無制限
3746	予備調査	無制限(現場)	無制限	定常, 広帯域または純音

* Standards for the Determination of Sound Power Levels emitted by Machinery and Equipment

** Masaru Koyasu (Acoustical Engineering Laboratory)

にみられるように、精度や測定音場によって区分されており、対象となる音源やデータの用途などによって、適当な方法を選定するようになっている。また3740は、3746を含めた一連の規格について、使い方の指針を示したものである。ここに掲載されている各規格の内容一覧表のなかで、主要な項目を要約して表-1に示す。

2.1 精度

この規格に従って求められるパワーレベルの精度は、表-1で3ランクに大別されている。ただ3746に規定されている方法は、現場での予備調査に適用されるものであって、実用性からみたパワーレベルの計測方法は、精密測定方法と工学的測定方法との2種類になる。ただし、実際の精度は音場の種類に関係し、例えば同じ精密測定方法でも、無響室あるいは残響室のいずれを使うかによって、期待できる精度は異なってくる。こうして、この規格によるパワーレベルの計測精度は、表-2のように細分される。この表では、各規格の精度が算出されるパワーレベルの標準偏差で示されている。

表-2 パワーレベル計測の制度（標準偏差の最大値）

規格 番号	オクターブ バンド(Hz)	125	250	500	1000 ~ 4000	8000	A 特性
	1/3オクターブ バンド(Hz)	100 ~ 160	200 ~ 315	400 ~ 630	800 ~ 5000	6300 ~ 10000	
3741 3742		3	2	15		3	
3743		5	3	2		3	2
3744		3	2	15		2.5	2
3745	(無響室)	1	1	0.5		1	
	(半無響室)	1.5	1.5	1		1.5	
3746							5

精度の面だけからいえば、無響室を使うのが最も優れた方法になることは明らかであるが、特殊な設備を必要とし、またパワーレベルを算出するためには多数点での音圧レベル測定値が必要になる。さらに無響室の構造からいって、測定できる機械などの寸法や重量にも限度が存在することになる。そのため、計測の対象やデータの用途に応じ、表-1, 2を参考にして測定方法を選択することが重要である。

2.2 計測方法の実際

表-1に示される各計測方法を測定場所からみると、特別な音響実験室を使うものと、その他の方法とに大別される。

2.2.1 音響実験室での計測

無響室および残響室は、音響実験のための基本的な設備として各種音響計測に使われている。パワーレベルの計測においても、音場の性質が明確に規定されている無響室や残響室を使う方法が基本になっている。ただ特別な場合を除いた普通の無響室や残響室では、室内のり寸法が最大でも数m~10m程度であるために、大型機械などの測定には使えないのが実状である。したがって精度は多少犠牲になっても、次頁2.2.2の方法によらなければならないことがある。

(1) 無響室での計測 (ISO 3745)

無響室内に置かれた音源から放射される音について、

1) 音源にあまり接近しない場所で、さらに

2) 壁からの反射音の影響が無視できる場所で測定された音圧の2乗値は、その場所の音の強さに比例する。そのために、音源を囲む任意の閉曲面上でこれを積分すれば、音源からの放射パワー、したがってパワーレベルを算出することができる。

実際には、閉曲面上の多数点で音圧レベルを測定する方法が使われる。ISO 3745では、音源の中心を原点とした半径 r の球面上に20個の測定点をとるように規定されている(ただし、半径 r は対象音源の最大寸法 a の2倍以上で、最小でも1m以下にならないようにする)。各点の音圧レベルを L_i とし、

平均音圧レベル \bar{L} を $\bar{L} = 10 \log_{10} \left[(1/20) \sum_{i=1}^{20} 10^{L_i/10} \right]$

とすれば、パワーレベル L_w は次式で算出される。

$$L_w = \bar{L} + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} - 10 \log_{10} \left[\left(\frac{423}{400} \right) \times \left(\frac{273}{273 + \theta} \right)^{0.5} \times \left(\frac{P}{1000} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 $S = 4\pi r^2$, $S_0 = 1\text{m}^2$, θ は室温 ($^{\circ}\text{C}$), P

は大気圧 (mbar) である。

無響室でパワーレベルを求める方法では、測定球面に対する条件から、音源の大きさが無響室容積の0.5%以下に制限されているが、この方法はすでに述べたように最も測定速度が高く、さらに音源の指向性情報もえられることを特徴にしている。

(2) 半無響室での計測 (ISO 3745)

パワーレベル計測に対する無響室の実用面での難点は、床面がネットやすのこで構成されているために、設置できる機械などの寸法や重量に制約があることである。そのために、床面の吸音層を取除いた室が、半無響室の名称でつくられており、大型機械や車両面の計測に広く使われている。

この場合にマイクロホン位置での床からの反射音と直接音との干渉をふせぐためには、²⁾音源を床面に

接する位置におけばよい(図-1)。この方法は半無響室の性能検査(逆2乗則からの偏差に測定)には使われているが、実際の機械類の測定にいつも適用することはできない。そのため、この場合のマイクロホン位置については、床面からの反射音の影響を少なくすることに注意して、図-2のように半球面上に10個の測定点を選ぶことが規定されている。

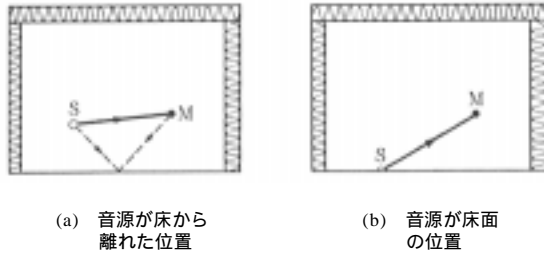


図-1 半無響室における音源位置と音の伝播性状
S: 音源, M: マイクロホン

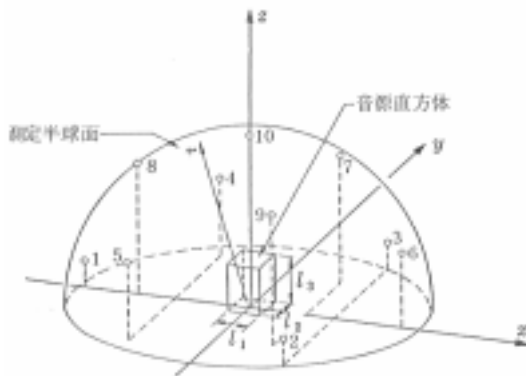


図-2 半無響室における半球面上マイクロホン配置

10個の音圧レベル測定値 L_i からのパワーレベル算出にも、(1)式が使われる。ただし、平均音圧レベル \bar{L} は、 $\bar{L} = 10 \log_{10} \left[(1/10) \sum_{i=1}^{10} 10^{L_i/10} \right]$ によって求められる。また $S = 2\pi r^2$ である。

(3) 残響室での計測 (ISO 3741, 3742)

よく設計された残響室の中で、定常的に音を放射し続けると、音源と室の境界面(壁, 床など)の近くを除いた室内の領域における音圧レベルは、ほぼ一定になる。そしてこの状態では、音源から放射される音のパワーと、室の全境界面で吸収されるパワー(これは室内の音のエネルギー密度に比例する)との間に釣合が保たれることになる。したがって、室の残響時間 T の計測によって境界面の吸音性能を求めておけば、音源および境界面近くを除いた室内の平均音圧レベル \bar{L} を計測し、次式を使って音源のパワーレベルを算出することができる。

$$L_w = \bar{L} - 10 \log_{10} \frac{T}{T_0} + 10 \log_{10} \frac{V}{V_0} + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1000} \right) - 14 \quad (2)$$

ここで、 $T_0 = 1s$, V : 室容積 (m^3), $V_0 = 1m^3$, S : 室の全表面積 (m^2), λ : 中心周波数に対する音の波長 (m), P : 大気圧 ($mbar$) である。

この方法では、 $\lambda/2$ 以上離れた3点以上のマイクロホン位置で音圧レベルを計測すればよいので、短時間での計測が可能である。ただこのためには、計測方法の原理からみて、残響室内の音場の拡散性を中心に、次の規定に従った計測設備と計測方法を適用することが必要である。

- 1) 測定の下限周波数に応じて、表-3に示される最小容積の条件を満足すること。

表-3 最低測定周波数に対する残響室の最小容積

最低周波数	最小室容積 (m^3)
125Hzオクターブまたは100Hz 1/3オクターブ	200
125Hz 1/3オクターブ	150
160Hz 1/3オクターブ	100
250Hz オクターブまたは200Hz 1/3オクターブおよびそれ以上	70

備考: 3000Hzの周波数での測定が必要なときには、容積は $300m^3$ 以下とする。

- 2) 室の形状選定, 拡散板や回転翼の適用によって拡散性の向上をはかること。
- 3) 音源から放射される音に純音や狭帯域騒音成分が含まれているときには、上記2条件だけでは不十分である。この場合には、ISO 3742を適用し、音源位置の数, 音圧レベル測定点の数についての規定に従って計測を行うこと。

残響室による方法は、実用的なパワーレベルの決定方法として多くの特徴を持っているが、無響室・半無響室による方法にくらべると以下のような相違点がある。

- 1) 定常騒音だけに適用できる方法で、衝撃音や間欠音など非定常騒音の計測には使うことができない。
- 2) 音源からの放射指向性を計測することはできない。
- 3) 音源の種類によっては、無響室に設置されたときにくらべて放射インピーダンスが変わるために、算出されたパワーレベルの値も変化することがある。一般に、その差は周波数が低くなるほど大きくなる。

- (4) 特定の残響室による計測 (ISO 3743)

残響室や無響室などの特殊施設を使わなくてもよい方法を規定したものである。試験室の条件としては、室容積が $70 \sim 300 \text{ m}^3$ の室で、残響時間が $T = (0.9 \sim 1.1) RT_N$ の間に入るように調整することになっている ($R = 1 + 275 / fV^{1/3}$, T_N は規定残響時間で別の規定によって $0.5 \sim 1.0$ 秒の値に定められる)。

計測は原則として残響室による方法と同様に、室内の平均音圧レベルを求めることになるが、一般に音源、受音点位置の数は ISO 3741 の場合よりも多くすることが必要であり、その定め方が規定されている。こうして求められた平均音圧レベル \bar{L} からパワーレベル L_w を算出するには、次式が使われる。

$$L_w = \bar{L} - 10 \log_{10} \frac{T_N}{T} + 10 \log_{10} \frac{V}{V_0} - 13 \quad (3)$$

実用的な計測方法の一つとして規定されているが、これまでわが国ではあまり使われていない。

2.2.2 半自由空間での計測 (ISO 3744)

前項 (2) で述べた半無響室での計測に対応するものであるが、現場を含めた実用的な計測として、以下に示す各条件での計測方法が規定されている。

- 1) 近似的な半無響室 (吸音構造の性能が、半無響室として要求されるより多少劣った実験室)
- 2) 地表面が平坦で、広い範囲にわたって開放された戸外。
- 3) 非常に大きな室や壁・天井に充分は吸音処理を行った室。

対象音源の寸法や発生音の性状には、原則として制限がないので、非常に適用範囲が広く、実用面では最も重要な方法である。

パワーレベルの算出は、半無響室による方法に準じ、音源を囲む閉曲面上で計測された音圧レベルを使って行われる。この規格では3種類のマイクロホン配置方法が規定されている。

そのなかで基本になるのは、半無響室の場合と同様に半球面上にマイクロホンを配置する方法である。この場合には、まず図-3に示すように機械など音源を囲む直方体を考え、原点から上の隅までの距離を d_0 としたとき、半球面の半径 r は $r \geq 2d_0$ の条件を満足するように、 $r = 1, 2, 4, 8, 12, 16 \text{ m}$ のなかから選ぶことになっている。この半球面上のマイクロホン位置としては、図-4に示す点が規定されている。普通には、10箇所基準測定点が使われるが、特に音圧レベルの変化が大きいときには、追加測定点を含めて20箇所測定することが規定されている。

ただこの方法では、大型の機械などの場合に半球面が非常に大きくなり、マイクロホンの配置がむず

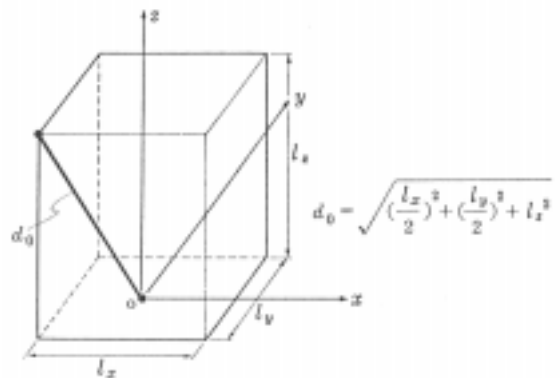


図-3 音源を囲む直方体と代表寸法 d_0

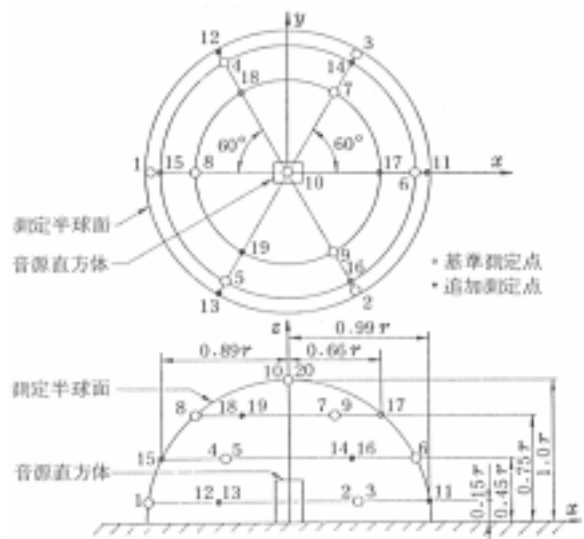


図-4 半球面上のマイクロホン配置

かしくなる。さらに現場計測では、対象音源から遠く離れたマイクロホンは他の騒音の影響を受けやすい。そのために、この規格では半球面配置のほかにも、実用的なマイクロホン配置として図-5, 6に示す2種類の方法が規定されている。

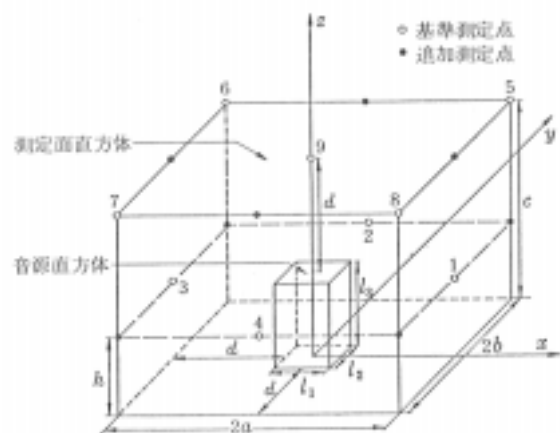


図-5 直方体面上のマイクロホン配置

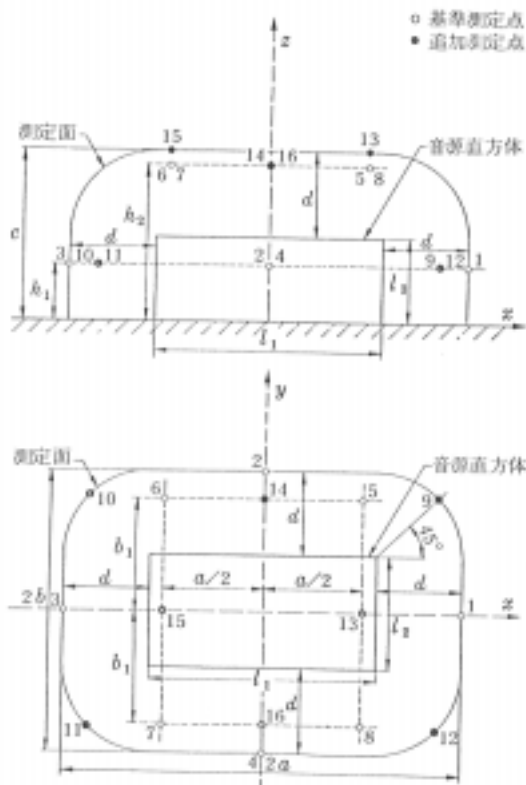


図-6 直方体と球面との合成面上のマイクロホン配置

図-5の直方体面配置は、実用的に最も簡単なマイクロホン配置である。音源直方体から測定面直方体までの距離 d は、やはり音源寸法に応じて定めようになっているが、普通には1 mにとることが多い。追加測定点の使い方は、半球面配置のときと同様である。

図-6の測定面は、直方体と球面とを組合せることによって、音源直方体面から各マイクロホンまでの距離が一定になるようにしたものである。この意味では望ましい配置であるが、現場でマイクロホン位置を決定するのに、図-5の場合より手間のかかることが避けられない。

3. 個別音源についてのパワーレベル計測方法規格

前章で概要を紹介した ISO 3740 ~ 3847 は、音源の種類を特定しないで、パワーレベル算出のための基本的な共通事項を規定したものである。ISO では、これをベースにして個別の機械ごとに、共通事項以外の規定、例えば運転条件などを規定する規格の制定が進められている。ここでは建設機械を例にして、その規定方法の概要を示す。

(1) 建設機械一般のパワーレベル決定方法

基本規格 ISO 3744 をベースにして次の規格が制定されている。

ISO 4872 - 屋外用建設機械からの放射騒音の測定方法 騒音許容限度への適合決定方法

ここでは、(1)マイクロホンの配置、(2)音圧レベルの測定、(3)機械の運転条件、(4)測定環境とその補正、(5)パワーレベルの算出、の各項目が規定されている。

マイクロホン配置としては、原則として半球面上配置を使うことが規定されており、図-7の2種類の配置が示されている。そのほかに特に大型機械の場合には、さきの図-5の直方体面上配置をとることができるようになっている。

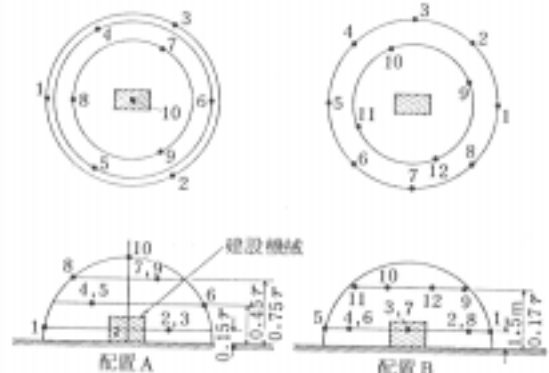


図-7 建設機械の騒音測定のための半球面上のマイクロホン位置 (ISO 4872)

(2) 土工機械のパワーレベル決定方法

建設機械のなかの土光機械（油圧ショベル、ブルドーザ、タイヤドーザ、トラクターショベルなど）について、前項に示した ISO 4872 を基礎にした規格の作成が進められている。

まずこれらの機械を定置させ、エンジンを定格回転で無負荷運転をしたときの計測方法について、下記の規格（原案）が作成されている。

ISO 6393 - 土工機械からの放射騒音の測定 - 外部騒音の許容限度決定方法 定置条件

ただ実際に土工機械の騒音資料として必要なのは、無負荷定置運転のときのデータではなく、作業時の騒音である。一般に機械騒音は負荷の変動に応じて変化し、特に土工機械の場合には、前進、後退あるいは回転など、機械の位置が移動することが多い。そのために、上記 ISO 6393 に続いて次の規格の作成が進められている。

ISO 6395 - 土光機械からの放射騒音の測定 - 外部騒音の許容限度決定方法 疑似作業条件

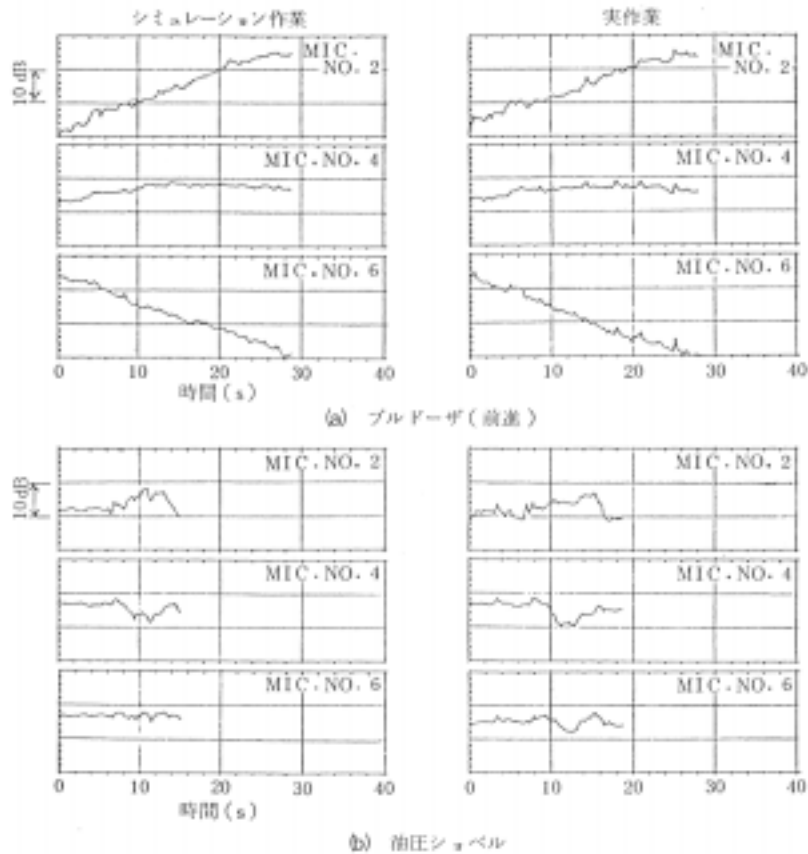


図-8 土工機械発生騒音の時間変動記録の例
 (日本建設機械化協会・建設機械化研究所「土工機械の作業時騒音パワーレベル測定方法に関する研究報告書」(昭和56年6月)から抜粋)

この規格では、土工機械の種類ごとに標準的な作業のシュミレーション(実際に土の堀削・運搬などを行わない)方法を規定し、これに従って機械を運転したときの騒音を計測することになっている。この場合の基本的なまいくろほん配置には、さきの図-7の半球面配置Bが使われる。

実際の各マイクロホン位置における騒音レベルは、上記のシュミレーション作業に応じて複雑な時間変動性状を示すことが多い。(社)日本建設機械化協会建設機械化研究所では、この規格草案の内容検討を中心にして、「土工機械の作業時騒音パワーレベル測定方法に関する研究」が実施された。³⁾ ここでの実験結果から、実作業とシュミレーション作業のそれぞれにおける騒音レベル時間変動記録の例を図-8に示す。

こうした騒音のパワーレベルを算出するために、この規格では半球面測定面上についての時間空間エネルギー平均値が使われている。具体的な方法としては、まず各マイクロホン位置ごとに、音圧計測値から次式によって、1ワークサイクルについての等価

騒音レベル L_{Aeq} を算出する。^{*}

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right\} \quad (4)$$

ここで、 $p_A(t)$ はA特性補正音圧、 $p_0 = 20 \mu Pa$ 、 $(t_2 - t_1)$ は1ワークサイクルの時間である。

これ以降の算出手順は、2.2.2のISO 3744の規定と原則的に同様である。

4. 音の強さの計測によるパワーレベルの算出

現在規格化されている音源のパワーレベル決定方法は、前章までに述べたように、すべて音源を囲む閉曲面上での音圧レベル計測をベースにしたものである。この場合には、測定場所の条件やマイクロホン位置などにいくつかの制約があり、パワーレベル算出の精度向上のためには、これらの点に注意をした計測を行うことが要求される。

^{*} 等価騒音レベルは 非常騒音評価の基本量の一つとして 広く使われている。

これに対して、最近の音の強さの計測手法が各方面で注目されており、その一つの応用としてパワーレベル計測への適用が試みられている。

音の強さ (Sound intensity) は、音の伝搬方向に垂直な単位面積を単位時間に通過する音のエネルギーとして定義されている。音場内の一点における音圧瞬時値 $p(t)$ 、粒子速度瞬時値を $\bar{u}(t)$ としたとき、音の強さ I は次式で与えられる。

$$\bar{I} = \langle p \cdot \bar{u} \rangle_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T p(t) \cdot \bar{u}(t) dt \quad (5)$$

音の強さは、音響理論における重要な基礎量であり、1930年代からその計測方法について多くの研究が行われてきた。「音響ワットメータ」などの名称で、計測器の試作・開発もいくつか行われた。ただ粒子速度の計測がむずかしいために、最近まで実用的な計測方法が確立されるまでには至らなかった。

しかし、小型マイクロホンの開発、デジタル信号処理技術の発展によって、数年前から実用的な音響インテンシティ計測技術、計測器が利用されるようになり、近い将来音響計測の主要技術となることが期待されている。

音の強さの計測手法として現在使われているのは、2-マイクロホン技術をベースとした方法である。これは2個の小型圧力マイクロホンを小さな間隔で配置し、(5)式の粒子速度 $\bar{u}(t)$ に対して2点の音圧の有限差分近似を用いるものである。

具体的な計測方法の一つは、2点の音圧を $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ とし次式によって音の強さを算出するものである。⁴⁾

$$\bar{I} \approx -\frac{1}{2\rho d} \cdot \overline{(p_1 + p_2) \int (p_2 - p_1) dt} \quad (6)$$

ただし、 d はマイクロホンの間隔である。この場合の計測システムを図-9に示す。

また音圧および粒子速度のフーリエ変換を、それぞれ $P(f)$ 、 $U(f)$ とすれば、周波数に対する音の強さ $I(f)$ は

$$\begin{aligned} I(f) &= \text{Re}[P(f) \cdot U^*(f)] \\ &= \frac{1}{2\pi f \rho d} I_m[G_{p_1 p_2}(f)] \end{aligned} \quad (7)$$

となり、2点の音圧信号のクロススペクトル $G_{p_1 p_2}(f)$ の虚数部をとることによって求められる。⁵⁾ すなわち

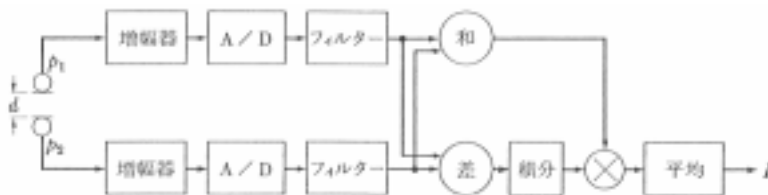


図-9 音の強さ計測システム

2チャンネルFFT分析器を利用すれば、簡単に音の強さを算出することができる。

ここに示した音の強さの計測手法を、音源を囲む閉曲面に適用することによって、音源のパワーレベルが次のように算出される。

$$(8) \quad L_w = 10 \log_{10} \left[\int \bar{I} \cdot d\bar{s} \right] - 120$$

このように、音の強さの計測によって音源のパワーレベルを算出する方法は、測定場所に極端な制約がなく、特に音の強さを計測する閉曲面の外側にある他の機械などからの騒音の影響を受けにくい。そのために、この方法は現場での実用的なパワーレベルの算出に対して、非常に有効な手法を提供することになるものと期待される。

5. むすび

ここでは、機械など音源のパワーレベル計測についてのISO規格の概要を解説するとともに、最近注目されている音の強さの計測技術をパワーレベルの計測に適用する方法についても、最近の動向を簡単に示した。

紙面の制約から、ISO規格の詳細、特に3743、3744で規定されている測定場所の条件による補正方法などを解説することはできなかった。実際にこれらの規格を使ったパワーレベルの計測を計画するときには、規格原文を参照されるようお願いする。

参考文献

- 1) 次の各解説に内容が紹介されているが、正式に規格として制定された段階で内容の一部変更があるので、注意されたい。
子安 勝：“騒音源のパワーレベル測定に関するISO規格審議の現状”，日本音響学会誌，Vol.32 (1976)，pp.172-177。
山口道征：“騒音源のパワーレベルの測定法”，音響技術，Vol.7, No.1 (1978)，pp.69-78。
- 2) 無響室・半無響室の設計については、下記の参照をされたい。
子安 勝：“無響室・半無響室の音響設計の基礎”，音響技術，Vol.5, No.3 (1976)，pp.73-78。
- 3) 日本建設機械化協会・建設機械化研究所：“土工機械の作業時騒音パワーレベル測定方法に関する研究”，(昭和56年6月)。
- 4) 佐藤利和：“音響インテンシティによる実用的な音響パワー測定を試み”，松賢技報，No.1 (1982)，pp.3-7。
- 5) F.J.Fahy：“Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals”，J.Acoust.Soc. Am., Vol.62(1977)，pp.1057-1059。