

音響パワーレベル標準の現状と課題

山田桂輔*

(平成 24 年 1 月 12 日受理)

A survey on sound power level standards

Keisuke YAMADA

Abstract

Sound power level is one of the physical quantities essential for the evaluation of sounds and it has been used as the basis of noise regulations or industrial standards in recent years. According to the industrial standards such as ISO (International Organization for Standardization) and JIS (Japanese Industrial Standards) for sound power level measurement, several methods are categorized in accordance with required accuracy or apparatus to be tested. The comparative method is most practical because the sound power level can be measured accurately without high-spec measurement facilities. In this method, the determination of the sound power level for a reference sound source is indispensable. A reference sound source is designed to generate flat and stable sound power for wide frequency range. The reference sound source with pre-determined sound power level is used as a reference and compared with apparatus under test. In Japan, many of the customers who carried out the sound power measurements have desired the calibration of reference sound sources in domestic calibration/test laboratory, but the calibration service has not been provided yet. To meet the customers' request, NMIJ (National Metrology Institute of Japan) decided to begin the calibration service of the reference sound source in 2014. In this report, firstly we investigate the situation of utilizing sound power levels in various countries, based on the regulations and the ISO standards for sound power level measurement, to make clear the importance of sound power level measurement and necessity of reference sound source calibrations. Then the component technology indispensable for developing the calibration system is revealed.

1. はじめに

人は日常的に様々な音にさらされているが、その中で人が不快に感じる音を騒音という。大きな騒音に長時間さらされることは、心理的不快感のみならず難聴などの身体的な健康被害を生じさせることがある。このような被害を防ぎ、人の生活環境の質を向上させるため、騒音の規制や抑制が行われてきた¹⁾。

騒音の規制や、低騒音の機器の開発のためには、音に関する物理量の定量的評価が必要となる。代表的な物理量として音圧レベルと、音響パワーレベルがある。音圧とは、音波が伝播する媒質中の、ある点での平均圧力からの圧力変化分である。音圧レベルとはこの音圧を基準となる音圧との比の常用対数で表したものである。これ

は、人間の音への感覚は音圧の対数に比例するためである。また、音響パワーとは、ある面を一秒間に通過する音の全エネルギーであり、音響パワーレベルは音響パワーを基準となる音響パワーとの比の常用対数で表したものである¹⁾。ただし、一般に音響パワーレベルと言った場合、上記の面として音源を囲む閉曲面をとったものを意味する。この場合の音響パワーレベルは単位時間に音源が放射する全エネルギーに対応したものであり、音源固有の値となる²⁾。

これらの二つの量のうち、日本で騒音の評価や規制のために主に利用されてきたのは音圧レベルである。音圧レベルに対し周波数ごとに人の聴覚に対応した重み付けを行った A 特性音圧レベル（一般には騒音レベルと呼ばれる）を用いて騒音が測定、評価され、規制が行われてきた。騒音規制法が生活環境の保全を目的として 1968 年に制定され、工場や建設工事に伴って発生する騒音の

* 計測標準研究部門 音響振動科 音響超音波標準研究室

規制を行うとともに、自動車騒音についても許容限度が定められている³⁾。また、公害対策基本法に基づき1973年には航空機騒音に係る環境基準が制定され⁴⁾、1975年には新幹線鉄道騒音に係る環境基準が制定された⁵⁾。環境騒音だけでなく機器の放射する音の評価に対しても音圧レベルが用いられ、音響パワーレベルは実用面では利用されてこなかった⁶⁾。

一方、欧米では音圧レベルだけでなく、音響パワーレベルも騒音を評価する量として実用的に用いられてきた。騒音に関する法律の制定が始まった1970年ごろから、騒音の人への曝露対策だけでなく、音源から放射される音そのものを減らすことも総合的な騒音対策として重要視された⁷⁾。音源からの放射騒音の評価には音響パワーレベルが適切であるとされ、1970年から汎用的な音響パワーレベル測定の規格がISO (International Organization for Standardization) においてアメリカ、ドイツ、フランスを中心として作成された。その後各国でISO規格をもとに国内規格が整備され、個々の機械ごとに放射騒音測定方法の規格化が進められている²⁾。

このように、機器が放射する音の評価に音響パワーレベルを利用している欧米に対し、日本では音響パワーレベルの利用は少なかった。しかし欧米へ工業製品の輸出を行う際に相手国の規格や規制へ適合させる必要が生じたため、1980年代後半になってISO規格に準じた音響パワーレベル測定のJIS (Japanese Industrial Standards) が整備された。国内においてはまず複写機、建設機械、空調機器で音響パワーレベルの測定が行われ始め⁸⁾、現在ではパーソナルコンピュータ、電動機などの製造メーカーも音響パワーレベルの測定を行っている。

本稿では国内外における音響パワーレベル測定を取り巻く現状と、標準整備の必要性、並びに標準開発の方針について述べる。

2. 音圧レベルと音響パワーレベルの定義

音圧レベル L_p [dB] はある点での音圧と基準音圧との比の常用対数として、次式で定義される。

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \quad (2.1)$$

ここで、 p [Pa] は音圧の実効値、 p_0 は基準音圧 20 μ Pa である。基準音圧 20 μ Pa とは、1 kHz の純音 (正弦音波) について人間の耳に聞こえる最も小さい音圧 (最小可聴値) の代表値である¹⁾。音圧レベルは周波数ごとに人の聴覚に対応した重み付けを行った、A 特性音圧レベル (騒

音レベル) として用いられることが多い。

音響パワーレベルは音響パワーを基準音響パワーとの比の常用対数で表したものである。音響パワーはある面を単位時間に通過する音の全エネルギーであるが、単位面積を単位時間に通過する音響エネルギーを音響インテンシティと呼ぶ。電気系では電圧と電流の積が電力であるが、音響系では音圧、粒子速度 (音波が空气中を粗密波として伝播するときの、媒質の分子の振動する速度)、音響インテンシティがそれぞれに対応する。

媒質内の一点における音響インテンシティ I [W/m²] はその点における音圧と、粒子速度の積の時間平均値で表される。

$$I = \overline{p(t)u(t)} \quad (2.2)$$

ここで、 $p(t)$ [Pa] は時刻 t における瞬時音圧、 $u(t)$ [m/s] は粒子速度である。なお、 $u(t)$ はベクトル量であるから、音響インテンシティもベクトル量となる。

図2.1のような系を考える。音源を取り囲むように閉曲面 S を設定すれば、音響パワー W [W] は、音響インテンシティの面積分として、

$$W = \int_S I dS = \int_S I \cdot n dS \quad (2.3)$$

と書くことができる。ここで、 I [W/m²] は部分面積 dS に対して垂直な音響インテンシティ、 n は閉曲面に対して垂直で外向きの単位ベクトルである。

音響パワーレベルは、基準値 W_0 [W] との比の常用対数の10倍をとり、以下のように表される。

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \quad (2.4)$$

ここで、音響パワーレベル L_W の単位は dB である。基準となる音響パワー W_0 は、音圧が 20 μ Pa である音波の、単位面積あたりの音響パワーの値として、 $W_0 = 1$ pW で与えられている。音響パワーレベルも、音圧レベルと同様の周波数重み付けをした、A 特性音響パワーレベルと

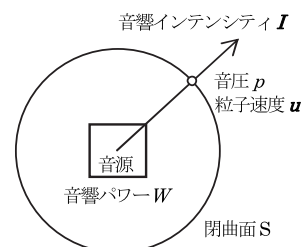


図2.1 音響パワーと音響インテンシティの関係¹⁾

して用いられる場合が多い。

音源を取り囲む球面を考えた場合、球面の半径をどのようにとっても球面を通過する音のエネルギーの総量は等しい。そのため単位面積当たりの音響パワーである音響インテンシティは球の表面積、すなわち音源からの距離の二乗に反比例する。また、音源から十分離れた位置では音圧と粒子速度は同位相でその比が定数となるため、音圧は距離に反比例し、音圧レベルは距離が r 倍になると $20 \log_{10} r$ dB だけ減少する。これを逆二乗則特性と呼ぶ。一方、音響パワーレベルは、閉曲面の取り方に依存しない音源固有の値である。

以上のように、音圧レベルは音源からの距離によって変化するため「ある地点において聞こえる音」の評価に適しているのに対し、音響パワーレベルは「音源から放射される音」の評価に適しており、理論的には音源の大きさ、形や指向性に依存せずに、定量的な評価、比較ができる。

このような特徴から、音響パワーレベルは以下のような用途に有用であるとされている^{2,9)}。

- ・ 機器の騒音仕様の表示や評価基準の設定

音源の音響パワーレベルは測定位置に依存しないので、機器の発生音の仕様を一つの値で表せる。そのため、様々な種類の機器を比較する際に有効であり、評価基準の設定も行いやすい。

- ・ 騒音予測

騒音防止対策として、騒音源を設置した時に想定される騒音の予測を行う場合がある。こうした予測計算では、騒音源の性質を表す量として音響パワーレベルが用いられる。

- ・ 機械騒音低減効果の評価

機械の開発において、主要な騒音発生機構・発生部位などを明らかにするための個々の要素の解析から、最終的な製品の騒音低減効果の確認・評価に至るまで、音響パワーレベルが騒音測定の基礎となる。

3. 音響パワーレベルによる各国の規制・規格・環境ラベル

機器の音響パワーレベルの測定・評価は、各国の騒音を規制する法律、規制や工業規格だけでなく、環境ラベル制度においても求められる。

環境ラベル制度とは、製品またはサービスについて、その環境特性に関する情報や環境基準への適合を文書やマークといった形で提供するものであり、環境マネジメントシステムに関する国際規格 ISO 14000 シリーズで規定されている¹⁰⁾。環境ラベルには3つのタイプがあり、あらかじめ規定された環境基準への適合を第三者機関が認定するもの（タイプ I）、製品の供給者が自ら環境基準を定め、それへの適合を自ら宣言するもの（タイプ II）、量的な環境負荷データを開示するもの（タイプ III）がある。タイプ I とタイプ II においては、製品にシンボルマークを表示することにより環境基準への適合を表すことが多い。

環境ラベル制度の運営は国ごとに行われているが、特に環境に対する関心の強い欧州では消費者の商品選択に与える影響が大きく、環境ラベルの取得は製品の競争力確保のために重要とされている¹¹⁾。以下に世界各地における規制・規格及び環境ラベルの歴史と現状を述べる。

3.1 日本

法律による騒音規制は音圧レベルに基づいて行われており、機器の販売に際して、音響パワーレベルを規制値以下にするよう求める法律はない。しかし近年、パーソナルコンピュータ、複写機、建設・土工作業機械、電動機では、ISO 規格及び IEC 規格との整合性をとる形で、JIS において音響パワーレベルの表示を求めている（表 3.1）^{12)~16)}。また日本の環境ラベルであるエコマーク（タイプ I）¹⁷⁾ の認定基準として、プリンタ、複写機では音響パワーレベルを一定値以下にすることが求められている（表 3.2）。さらに、国土交通省が行っている低騒音型建設機械の認定¹⁸⁾ も、過去には音圧レベルによる基準が設けられていたが、1997 年から音響パワーレベルによる

表 3.1 個別の機械に対する音響パワーレベル関連規格の一例^{12)~16)}

JIS	ISO/IEC 規格	規格名
JIS A 8305	ISO 4872	建設機械の騒音の音響パワーレベル測定方法
JIS A 8317-1	ISO 6395	土工機械—音響パワーレベルの決定—動的試験条件
JIS X 7779	ISO 7779	音響—情報技術装置から放射される空気伝搬騒音の測定
JIS X 7778	ISO 9296	音響—情報技術装置の表示騒音放射値
JIS C 4210	IEC 60034-9	一般用低圧三相かご形誘導電動機

基準値に切り替えられ、認定が実施されている（表 3.3）。

3.2 EU (European Union)

EUではEC (European Council) 指令により、機械類の安全に関する要求項目の一つとして発生音の表示を求めており、特に発生音の大きいものに関しては音響パワーレベルでの表示が義務付けられている^{19,20)}。野外作業機械については個別に規制があり、いくつかの機械に対しては発生音の上限値を音響パワーレベルで定めている²¹⁾。これらのEC指令に基づく要求を満たしていない製品は、EU内での販売ができない。

またドイツの環境ラベルであるブルーエンジェル（タイプI）²²⁾は、工事作業機械、パーソナルコンピュータ、複写機、空調設備、冷蔵・冷凍機器などの認定条件として、音響パワーレベルを基準値以下にすることを要求している（表 3.4）。なお、ブルーエンジェルは世界で初めて制定された環境ラベルであるため、多くの国で環境ラベルの参考とされており、その影響力も大きい。ブルーエン

ジェルは多くの機器で音響パワーレベルの抑制を求めているため、それを参考としている他の国でも音響パワーレベル測定が求められる範囲は今後広がっていくと考えられる。

3.3 アメリカ

アメリカでは音響パワーレベルによる騒音の規制に関する法令はない。主要な環境ラベルであるグリーンシール（タイプI）²³⁾やエネルギースター（タイプII）²⁴⁾は主に商品の素材や省エネルギーに重点が置かれ、音響パワーレベルを用いた騒音基準はない。しかしOA機器、家電製品などに対しては音響パワーレベルによる評価が古くから広く行われており、ISO規格や、国内規格であるANSI規格に従った測定や表示を各メーカーが自主的に行っている。

3.4 アジア

中国、韓国、台湾、タイなどでは製造業の発達に伴う欧米への輸出の増加を背景とし、音響パワーレベルの利

表 3.2 エコマークの認定基準の一例¹⁷⁾

類型番号	商品類型	A 特性音響パワーレベル 上限値 [dB]	関連規格
No. 117	複写機		JIS X 7779, JIS X 7778
	：白黒	$(59 + 0.35i)$ もしくは 75.0 (小さい方の数値を採用)	(ISO 7779, ISO 9296)
	：カラー	$(61 + 0.30i)$ もしくは 75.0 (小さい方の数値を採用)	
i :一分あたりの印刷枚数			
No. 122	プリンタ		JIS X 7779, JIS X 7778
	：白黒	$(59 + 0.35i)$ もしくは 75.0 (小さい方の数値を採用)	(ISO 7779, ISO 9296)
	：カラー	$(61 + 0.30i)$ もしくは 75.0 (小さい方の数値を採用)	
i :一分あたりの印刷枚数			

表 3.3 低騒音型建設機械 認定基準の一例¹⁸⁾

機種	エンジン出力 P [kW]	A 特性音響パワーレベル 上限値 [dB]
ブルドーザー	$P < 55$	102
	$55 \leq P < 103$	105
	$103 \leq P$	105
バックホウ	$P < 55$	99
	$55 \leq P < 103$	104
	$103 \leq P < 206$	106
	$206 \leq P$	106
空気圧縮機	$P < 55$	101
	$55 \leq P$	105
発動発電機	$P < 55$	98
	$55 \leq P$	102

用が行われ始めている。国内でも欧州の騒音基準が取り入れられており、各国で環境ラベルが制定されている¹⁰⁾。

3.5 環境ラベルの相互認証

各国の環境ラベルは相互認証の動きが進んでおり、日本のエコマークはプリンタ/複写機に関して2002年から北欧5カ国のノルディックスワン(タイプI)と、2003年から韓国の韓国環境ラベル(タイプI)と、2004年からタイのグリーンラベル(タイプI)、台湾のグリーンマーク(タイプI)と、2005年からニュージーランドのニュージーランド環境チョイスと相互認証協定を結んでいる¹⁰⁾。

4. 音響パワーレベルの測定法

音響パワーレベルの測定法はISO規格やそれに対応した各国の工業規格に規定されており、騒音規制への適合証明や環境ラベルの認定のためには測定規格に従った音響パワーレベルの測定が必要とされる。

音響パワーレベルの測定法には、大きく分けて絶対測定法と比較測定法がある。本章では、これらの音響パワーレベル測定法について説明し、そのなかで、既知の音響パワーレベル出力を持つ基準音源との比較による測定の利点を明らかにする。

4.1 絶対測定法

絶対測定法は、音源のまわりの複数の点で音圧もしくは音響インテンシティを測定し、これらの値から音響パワーレベルを算出する方法である。以下に、音圧測定による方法(音圧法)、音響インテンシティ測定による方法(音響インテンシティ法)を説明する。

4.1.1 音圧法

音圧法は測定を行う音場(音波の存在する空間)の性質により自由音場法と拡散音場法に分類される。さらに、測定精度によって複数の測定規格が存在している。JIS及びISO規格との対応関係を含めて、表4.1に示す。

以下ではそれぞれの音場における音響パワーレベルの算出方法について述べる。なお、補正項などJISとISO規格に違いがあるものに関してはISO規格に従っている。また、式中で用いられている記号に関しては、本稿中での統一のためISO規格で用いられているものと異なる場合があることに注意を要する。

4.1.1.1 自由音場法²⁵⁾⁻²⁷⁾

自由音場とは室壁面などの境界による音の反射の影響を無視できる音場であり、壁面を吸音くさびで覆った無響室はほぼ自由音場と見なせる。また、床面のみ音を完全に反射し、床面より上方が自由音場となる音場を半自

表 3.4 Blue Angel の認定基準の一例²²⁾

類型番号	商品類型	A 特性音響パワーレベル	
		上限値 [dB]	関連規格
RAL-UZ 122	複写機、プリンタ、複合機		EN 27779 (ISO 7779),
	：白黒	(59 + 0.35 <i>i</i>) もしくは 75.0 (小さい方の数値を採用)	ISO 9296
	：カラー	(61 + 0.30 <i>i</i>) もしくは 75.0 (小さい方の数値を採用)	
		<i>i</i> :一分あたりの印刷枚数	
RAL-UZ 78a	パーソナルコンピュータ		EN 27779 (ISO 7779),
	：ハードディスク稼働時	42.0	ISO 9296
	：アイドル時	38.0	
	：光学ドライブ稼働時	50.0	
RAL-UZ 78d	ノートブックコンピュータ		EN 27779 (ISO 7779),
	：ハードディスク稼働時	40.0	ISO 9296
	：アイドル時	35.0	
	：光学ドライブ稼働時	48.0	
RAL-UZ 127	デジタルプロジェクタ		EN 27779 (ISO 7779),
	：1,750 lm 未満	33.0	ISO 9296
	：1,750 lm 以上 2,750 lm 未満	35.0	
	：2,750 lm 以上	37.0	
RAL-UZ 138	冷蔵庫、冷凍庫	38.0	EN 28960 (ISO 8960)

由音場という。半自由音場を実現する室を半無響室といい、重量のある機器の測定に用いられることが多い。

自由音場法では、自由音場または半自由音場において音源を囲む閉曲面上で音圧を測定し、音響パワーレベルを算出する。

式 (2.3) に基づいて音源を囲む閉曲面 S を N 個に離散化すれば、音響パワーは、

$$W = \sum_{n=1}^N I_n S_n \quad (4.1)$$

と書くことができる。ここで、 I_n [W/m^2] は n 番目の部分曲面に垂直な音響インテンシティ、 S_n [m^2] は n 番目の部分曲面の面積である。

音源から放射される音は定常音であり、閉曲面 S は音源から十分に離れているならば、そこを通過する音波は平面波と見なすことができる。平面波では、音圧と粒子速度は同位相になるので、その比は定数となり、

$$u(t) = \frac{p(t)}{\rho c} \quad (4.2)$$

と書くことができる。ここで、 $u(t)$ [m/s] は粒子速度、 $p(t)$ [Pa] は音圧、 ρ [kg/m^3] は空気の密度、 c [m/s] は空気中の音速である。 ρc は音響インピーダンスと呼ばれ、電気系のインピーダンス（抵抗）と同様、音波の伝播の抵抗となる、媒質の特性値である。

式 (4.1) で表された音響パワー W [W] は、式 (2.2) より

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{p_n^2}{\rho c} S_n \quad (4.3)$$

と書くことができる。ここで、 p_n [Pa] は n 番目の部分曲面での音圧の実効値である。式 (2.4) で述べたように、式 (4.3) を音響パワーレベル L_w [dB] で表せば、

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{1}{W_0} \sum_{n=1}^N \frac{p_n^2}{\rho c} S_n \quad (4.4)$$

である。基準となる音響パワー W_0 は 1 pW である。

ここで、閉曲面 S 上における音圧レベルの平均値を \overline{L}_{pf} [dB] とし、

$$\overline{L}_{pf} = 10 \log_{10} \frac{1}{S} \sum_{n=1}^N \frac{p_n^2}{p_0^2} S_n \quad (4.5)$$

と表すと、式 (4.4) は

$$L_w = \overline{L}_{pf} + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} + 10 \log_{10} \frac{1}{W_0} \frac{p_0^2}{\rho c} S_0 \quad (4.6)$$

と変形できる。ここで、 S [m^2] は測定閉曲面の面積であり、面積 S_0 は 1 m^2 、 p_0 は基準音圧 $20 \text{ } \mu\text{Pa}$ である。 \overline{L}_{pf} [dB] は表面音圧レベルと呼ばれる。

空気の音響インピーダンス ρc は気温と気圧に依存するので、式 (4.6) における第 3 項を以下のように変形する。まず ρc は ISO 3745 では気温と気圧の関数として

表 4.1 測定原理及び測定環境で分類した音響パワーレベル測定規格²⁵⁻³²⁾

測定方法	種類	測定音場 測定室	測定原理	ISO	JIS
自由音場法	精密	無響室	音源を囲む閉曲面上の音圧 p に基づいて 音響パワーを求める	3745	Z 8732
半自由音場法	精密	半無響室			
音圧法	準半自由音場法	実用 簡易	大きな室 野外	3744 3746	Z 8733
	拡散音場法	精密	残響室	3741	Z 8734
準拡散音場法	実用	一般の室	室内の平均二乗音圧から、平均エネルギー密度 $E = p^2 / \rho c^2$ を算出し、これと音源の音響パワーとの関係から音響パワーを求める	3743	
	簡易			3747	
音響インテンシティ法	精密	無響室	音源を囲む閉曲面上の音の強さ(音響インテンシティ)を直接測定し、これを面全体に積分して音響パワーを求める	9614-1, 2	Z 8736-1, 2
	実用	半無響室			
	簡易	一般の室			

$$\rho c = 400 \sqrt{\frac{314}{\theta} \cdot \frac{B}{B_0}} \quad (4.7)$$

と近似されている。ここで、 θ [K] は気温、 B [hPa] は気圧、 B_0 は 1013.25hPa である。また、 p_0 、 S_0 、 W_0 に各数値を代入すると

$$\frac{1}{W_0} p_0^2 S_0 = 400 \quad (4.8)$$

となるため、式 (4.6) における第 3 項は式 (4.7)、(4.8) を用いると、

$$-10 \log_{10} \sqrt{\frac{314}{\theta} \cdot \frac{B}{B_0}} \quad (4.9)$$

と表される。

式 (4.6) 及び式 (4.9) より、気温 θ [K]、気圧 B [hPa] における音響パワーレベル L_w [dB] は

$$L_w = \overline{L_{pf}} + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} - 10 \log_{10} \sqrt{\frac{314}{\theta} \cdot \frac{B}{B_0}} \quad (4.10)$$

となる。

表 4.1 に示すように、ISO 規格では音圧法におけるパワーレベル測定法は精密法、実用法、簡易法に分けられている。式 (4.10) の第 3 項は一般的に小さい値となるため、ISO 3745 で規定される精密測定時のみ考慮される。また、精密測定時には式 (4.10) に対し、音源から放射される音響パワー自体が気温と気圧により変化することを考慮した補正（詳細は付録 (A) を参照）と、空気中で熱エネルギーとして失われる音波のエネルギーに関する補正（付録 (B)）を加える²⁵⁾。

以上の測定原理では、測定閉曲面上で観測される音圧は音源からの直接音の音圧のみであり、測定面外部からの反射音があってはならない。しかし ISO 3744 や ISO 3746 に規定される実用法や簡易法では、ISO 3745 で要求される条件を満たす無響室もしくは半無響室以外での測定も可能としている。そのような環境下では暗騒音や反射音の影響を考慮する必要があるため、音響パワーレベルは以下ようになる。

$$L_w = \overline{L_{pf}} + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} - K_1 - K_2 \quad (4.11)$$

K_1 は暗騒音に対する補正、 K_2 は反射音に対する補正

である。

暗騒音に対する補正 K_1 は、測定対象物が放射する音が暗騒音に対して十分に大きければ無視できるが、そうでない場合には考慮する必要がある。

反射音に対する補正 K_2 は、既知の音響パワーレベル出力を持つ基準音源を用いて決定するか、あるいは以下のように計算される。

$$K_2 = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{4S}{A} \right) \quad (4.12)$$

ここで、 A [m²] は室の等価吸音面積である。室の等価吸音面積とは室の壁面積と壁面の吸音率（壁で吸収される音響パワーと壁に入射する音響パワーの比）の積であり、室の壁面における音エネルギーの吸収効果を表す。等価吸音面積は ISO 354³³⁾ に従って測定される。

4.1.1.2 拡散音場法²⁸⁾⁻³¹⁾

拡散音場とは、空間内のどの位置でもエネルギー密度が一樣で、すべての方向から音が等確率に入射するとみなせる音場である。壁、床、天井を反射性の材質で仕上げた残響室が、ほぼ拡散音場と見なせる音場である。

残響室に音響パワー W [W] の音源を置いたときの室内の定常状態における音響エネルギー密度を E [J/m³] とする。残響室の壁面に音がすべての方向から等確率に入射するとき、音源から供給されるパワーと残響室の壁面における吸音パワーとの平衡関係は、

$$W = E c \alpha S_R \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta = \frac{E c A}{4} \quad (4.13)$$

と表せる¹⁾。ここで、 c [m/s] は音速、 a は壁の吸音率、 S_R [m²] は室壁面積、 A [m²] は等価吸音面積である。

拡散音場では、音響エネルギー密度 E と音圧の実効値 p との間には、

$$E = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (4.14)$$

の関係がある。式 (4.13) および (4.14) から、音響パワー W は、

$$W = \frac{p^2 A}{\rho c^4} \quad (4.15)$$

と書くことができ、式 (4.15) を常用対数表記すれば、

$$10 \log_{10} W = 10 \log_{10} p^2 + 10 \log_{10} A - 10 \log_{10} \rho c - 6 \quad (4.16)$$

であるから、音響パワーレベル L_W は、

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} + 10 \log_{10} \frac{A}{A_0} + 10 \log_{10} \frac{1}{W_0} \frac{p_0^2}{\rho c} A_0 - 6 \quad (4.17)$$

となる。ここで、 A_0 は 1 m^2 である。式 (4.17) が、拡散音場における、音圧と音響パワーレベルの理論的な関係式である。

現実の測定では理想的な拡散音場の実現は困難なため、音圧は複数点で測定を行いその平均値を採用する。室内空間平均音圧レベル \bar{L}_p [dB] を

$$\bar{L}_p = \left(10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{p_n^2}{p_0^2} \right) \quad (4.18)$$

と表す。 p_n [Pa] は n 番目の測定位置における音圧の実効値である。式 (4.18) 及び式 (4.9) を用いると、式 (4.17) は、

$$L_W = \bar{L}_p + 10 \log_{10} \frac{A}{A_0} - 10 \log_{10} \sqrt{\frac{314}{\theta}} \cdot \frac{B}{B_0} - 6 \quad (4.19)$$

と表される。

さらに、ISO 3741 で規定される精密測定法ではいくつかの補正項を式 (4.19) に加える。補正項の1つは、Waterhouse 補正と呼ばれるものである (付録 (C))。一般に残響室では室内の壁面近傍で音響エネルギー密度が大きくなる傾向があるため、実際に測定された平均音圧レベルと理論的な拡散音場における室内平均音圧レベルの差の補正を行う。2つ目の補正は、音源から出た音が壁面で反射し、拡散音場を形成するまでの時間に関する補正である (付録 (D)) [28]。さらに、自由音場法と同様に音源から放射される音響パワーの気温と気圧による変化を考慮した補正項 (付録 (A)) を加えることにより、基準環境における音源の音響パワーレベルが求められる。

4.1.2 音響インテンシティ法³²⁾

音響パワーレベルは、音響インテンシティを直接測定することでも求められる。すなわち式 (2.3) に基づいて音源を取り囲むように閉曲面を定めて離散化し、離散化

した各点の音響インテンシティから音響パワーを求める方法である。

一般に、音響インテンシティは2マイクロホン法によって計測されることが多い。音響インテンシティを求めるには音圧と粒子速度を求める必要があるが、2マイクロホン法では、2つのマイクロホンがある間隔で離して設置し、音圧は2つのマイクロホンで測定された音圧の平均値を用い、粒子速度は2つのマイクロホンで測定された音圧の差から、オイラーの運動方程式を利用して近似的に求める³⁾。

この方法の利点として、平面波と見なせる距離にまで測定点を離す必要がある自由音場法や半自由音場法と異なり、測定対象近傍で測定できることがある。また、音響インテンシティ法では、外部ノイズによる影響を理論的には受けない。これは、測定対象物を取り囲むように設定した閉曲面外に存在する音源から放射された音は、閉曲面に入ってくる時と、出ていく時で音響インテンシティの向きが逆になり、閉曲面全体について積分する際に打ち消されるためである。

一方、欠点としては、低域から高域までをマイクロホン間隔を変えずに測定することが原理的に困難であることが挙げられる。波長が長くなる低い周波数では、マイクロホン間の音圧差を正確に求めるために、マイクロホン間隔を広くする必要がある。一方で高い周波数では波長が短くなるためマイクロホン間隔を近接させる必要が生じる。また、同時刻でのマイクロホン間の音圧の差から粒子速度を求める方法なので、使用する2つのマイクロホンの感度の絶対値だけでなく、位相差の校正が必要である。

4.2 比較測定法

音響パワーレベルの測定法として、放射する音響パワーレベルが既知の基準音源との比較による方法 (比較測定法) が規格化されている^{26)~31)}。

自由音場において、測定対象物が放射する音響パワーレベル L_W は、式 (4.11) より

$$L_W = \bar{L}_{pf}' + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} - K_2 \quad (4.20)$$

である。ここで、 \bar{L}_{pf}' は暗騒音の補正を行った表面音圧レベルである。音響パワーレベルが既知である基準音源を、試験環境内の測定対象物と同じ位置に据え付けると、

$$L_{Wref} = \bar{L}_{pref}' + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} - K_2 \quad (4.21)$$

が成り立つ。ここで、 L_{Wref} は、基準音源の音響パワーレベルであり、既知の値である。また、 $\overline{L}_{p'pref}$ は暗騒音の補正を行った表面音圧レベルである。式(4.20)および(4.21)から、測定対象物の音響パワーレベルは、

$$L_W = L_{Wref} + (\overline{L}_{p'} - \overline{L}_{p'pref}) \quad (4.22)$$

となる。

拡散音場においては、測定対象物の音響パワーレベルを L_{W_r} とすると、式(4.19)に基づけば

$$L_{W_r} = \overline{L}_p' + C \quad (4.23)$$

と書くことができる。ここで、 \overline{L}_p' は暗騒音の補正を行った室内空間平均音圧レベルであり、 C [dB] は式(4.19)において \overline{L}_p を除く項とする。放射する音響パワーが L_{Wref_r} [dB] である基準音源を同一環境下で測定すれば、

$$L_{Wref_r} = \overline{L}_{p'pref} + C \quad (4.24)$$

が成り立つ。ここで、 $\overline{L}_{p'pref}$ [dB] は基準音源を用いて測定された室内空間平均音圧レベルに暗騒音の補正を行ったものである。式(4.23)および(4.24)から、測定対象物の音響パワーは、

$$L_{W_r} = L_{Wref_r} + (\overline{L}_p' - \overline{L}_{p'pref}) \quad (4.25)$$

になる。

4.3 音響パワーレベル測定法のまとめ

音響パワーレベルの測定法について概観したが、4.1節からわかるように、絶対法はさまざまな補正量が必要であり、その補正量の中には正確な測定が難しいものも含まれている。そのため絶対法は高い測定技術力と知見を要する。一方、比較法では、4.2節で述べたように、放射する音響パワーが既知の基準音源があれば測定環境による補正量を求める必要が無く、複数点における音圧を測定するだけで正確に音響パワー計測が可能である。

5. 基準音源の特性と供給体制

5.1 基準音源

比較測定法に用いられる基準音源は、十分かつ安定した音響パワー出力と平坦な周波数特性及び全指向性を持

つ小型の広帯域雑音性音源である。ISO 6926³⁴⁾に基準音源が満たすべき要求事項と、その音響パワーレベルの校正法が規定されている。表 5.1 に内容を示す。

古くは、スピーカーやタッピングを利用するものが存在したが³⁵⁾、長期間にわたる安定性、発生する音の指向性の問題などがあったため、現在ではファン形と呼ばれる、垂直方向の回転軸を持つシロッコファンの乱流騒音を利用するものが一般的に使われている。

図 5.1 は Brüel & Kjær 社が販売している基準音源 (Reference Sound Source Type 4204) である。この基準音源がデファクトスタンダードとなっており、国内はもちろんのこと世界中で広く使われている。

5.2 国内外における基準音源校正の現状

長らく音響パワーレベル測定が行われてきている欧州では、産業界からの要請を受けて基準音源の音響パワーレベルの標準供給体制が整備されている。ISO/IEC 17025 (IEC: International Electrotechnical Commission) の適合認定に基づいた基準音源の音響パワーレベル校正について、諸外国の標準供給体制は図 5.2 のように二つに分けて考えることができる。国ごとの分類には難があるが、敢えて分類すれば、NMI が直接基準音源の校正を行っている国としては、ドイツ、イタリア、スウェーデンなどがある。PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt: ドイツ)、INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica: イタリア)、SP (SP Technical Research Institute of Sweden: スウェーデン) が国の標準研究所 (National Metrology Institute: NMI) として直接ユーザの基準音源の校正を実施している。

PTB および INRiM が宣言する拡張不確かさを参考として表 5.2 に示す。日本における予定に関しては後述する。

校正事業者が校正を行っている国としては、アメリカ、イギリスなどがある。アメリカやイギリス国内では、基準音源の校正に必要なマイクロホンの感度などを NMI が供給し、ISO/IEC 17025 に基づく適合認定を受けた NMI 以外の校正機関が基準音源の校正を行っている。

日本国内においては、基準音源の音響パワーレベルを試験成績書として発行している機関はあるものの、ISO 6926 に準じた校正は行われていない。そのため、ISO 6926 に準じた基準音源の校正を必要とする国内のユーザは、海外の NMI や校正機関に校正を依頼するしかなく、海外への依頼となるため校正に時間がかかること等の不便を強いられている。

そのような背景から、音響パワーレベル測定を行って

表 5.1 測定原理及び測定環境で分類した音響パワーレベル測定規格²⁵⁻³²⁾

繰り返し条件下の 音響パワーレベルの 標準偏差の最大値		周波数特性	指向性	校正法
周波数範囲 [Hz]	標準偏差 [dB]	全ての 1/3 オクターブバンド音 響パワーレベルが 16 dB 以内 にあり、隣接する 1/3 オクター ブバンドの音響パワーレベル の差が 4 dB を超えない	測定表面上で測定された音圧 レベルの最大値と、同一測定表 面の表面音圧レベルとの差が、 100 Hz -10 kHz の 1/3 オク ターブバンドにおいて 6 dB を 超えない	半無響室(床面最小寸 法 6 m 以上)または残 響室(最少寸法 4 m 以 上)を用いた絶対測定 法
50 - 80	0.8			
100 - 160	0.4			
200 - 20 k	0.2			



図 5.1 ファン型基準音源 Reference Sound Source Type 4204 (Brüel & Kjaer) φ 300 mm × 300 mm

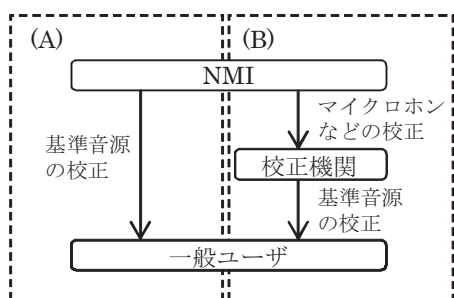


図 5.2 諸外国における基準音源の標準供給体制

表 5.2 各国の標準研究所による基準音源の音響パワーレベル校正

標準研究所	国名	周波数 [Hz]	拡張不確かさ[dB] (k=2)
PTB [36]	ドイツ	100-20 k	0.6(1000 Hz)
INRiM [37]	イタリア	100-10 k	1.5(100 Hz-10 kHz)
NMIJ (予定)	日本	100-10 k	1.0(100 Hz-10 kHz)

いる国内企業は国内での基準音源の校正を求めている。

ISO 6926 に準じた基準音源の校正のためには、ISO 3745 あるいは ISO 3741 で要求される半自由音場、あるいは拡散音場における音響パワーレベル測定が必要になる。後述する理由から、実現可能な不確かさの面で、校正は半自由音場で行うことが望ましい。しかし半自由音場では基準音源から発生する風の影響を避けるために測定球面の半径を 2 m とする必要がある、十分な大きさの半無響室が必要となる³⁴⁾。現状では NMIJ 以外でそのような無響室を持つ校正機関はなく、ISO 6926 に従った基準音源の校正ができる状況にない。そのため、NMIJ が基準音源の校正を実施する必要がある。

校正サービスの提供先としては、複写機やパーソナルコンピュータの製造メーカーなどの十数社が現在考えられる。将来的には、家電、空調機メーカーが想定される。今後、音響パワーレベルの利用が普及すれば、さらに提供先は増えると推察される。

6. NMIJ における基準音源校正の研究開発

6.1 基準音源の校正法

基準音源の校正法は ISO 6926 に規定されているので、NMIJ ではこの規格に準拠した校正を実施する。ISO 6926 には、絶対測定法に基づいた、2 通りの音響パワーレベル校正法が規定されている。一つは自由音場法に基づいた校正法、もう一つは拡散音場法に基づいた校正法である。NMIJ では、自由音場法に基づいた校正を実施する。理由は以下のとおりである。

一つは、マイクロホンの感度校正の不確かさである。自由音場法、拡散音場法とも、音圧は音響パワーレベル校正における主要な測定量の 1 つである。音圧はマイクロホンによって測定されるが、自由音場法では自由音場

感度、拡散音場法では拡散音場感度と呼ばれる、それぞれの音場に対応したマイクロホン感度が必要となる。自由音場感度に関しては国際的に信頼性の高い校正法が確立している一方^{38,39)}、マイクロホンの拡散音場感度に関しては簡略化された校正法が規格化されているのみであり⁴⁰⁾、拡散音場感度校正の校正不確かさは自由音場感度と比べれば大きい。

また、4.1.1.2で述べたように、拡散音場法では残響室の拡散音場としての不完全性に関する補正が必要になり、自由音場法に比べ検討すべき不確かさ要因が増える。

以上のような理由から、拡散音場法では自由音場法よりも小さな不確かさの実現が現状では難しいと考えられる。

6.2 基準音源校正の開発目標

第3期標準整備計画に従い、2014年度内に校正サービス開始を目指し、校正技術の開発を行う。

校正対象とする器物は、Brüel & Kjær社のReference Sound Source Type 4204を対象とする。校正周波数範囲は100 Hz - 10 kHz (1/3 octave band)、目標とする不確かさは1 dBである。

校正周波数範囲100 Hz - 10 kHzは日本で主な測定対象となっているパーソナルコンピュータ、複写機などが、ISO 7779で測定を求められている周波数範囲である¹⁹⁾。また、産業界における音響パワーレベルでの騒音評価では、2 dB程度の増加や減少があると、差が生じたと判断されることが多い^{41,42)}。そのため、NMIJでは1 dB程度を校正の不確かさの目標とする。将来的には必要に応じて校正周波数範囲の拡大、校正の不確かさ低減を図る予定である。

また、この基準音源は電動モータで駆動されたファンの風切り音を発生しているため、電源周波数によってモータの回転数が変化すると放射される音響パワーレベルが変化する。そのため、日本の商用電源周波数50 Hzと60 Hzの両方で校正ができるようにする。

6.3 校正技術開発における開発要素技術

自由音場法による基準音源の音響パワーレベル校正を実現するにあたり、現時点で想定している開発要素技術は(1)測定環境の妥当性確認、(2)マイクロホンの設置固定治具の最適化、(3)マイクロホンの自由音場感度校正方法の検討、(4)校正値の妥当性評価、が挙げられる。

(1) 測定環境の妥当性確認

基準音源の校正規格ISO 6926において、自由音場法

による校正は半無響室で行うこととされている。NMIJには半無響室がないため、無響室の網床の上に木板を敷き詰めることで半無響室と同等の環境を構築する。このような方法で半無響室を実現することは他の測定機関でも行われているが⁴³⁾⁻⁴⁵⁾、ISO 6926で要求される半無響室の条件を満たすかの確認が必要である。具体的には、音圧レベルの逆二乗則特性の成立の確認を測定によって行う。また、コンクリートの床面を持つ通常の半無響室と比べて基準音源の動作による振動の影響が大きい可能性もあるため、床面の振動とそれが測定に与える影響を評価し、必要であれば対策を施す。

(2) マイクロホンの設置固定治具の最適化

半無響室での基準音源の校正は、図6.1のように基準音源を囲む半径2.0 mの半球面上で音圧を測定することによって行われる。音圧の測定は、ISO 6926には図6.1に示すような20点の離散配列でマイクロホン位置を固定する方法のほか、1つのマイクロホンをらせん、子午線、または同軸円上で移動させながら測定する方法がある。移動させながらの方法では、マイクロホンを移動させる装置が必要となるが、移動を精密に行うためには装置の室への固定や剛性の確保が必要となる。結果としてマイクロホンを固定する方法と比べて装置が大型化し、自由音場を乱す恐れが大きくなる。そのため、NMIJとしては、マイクロホン位置を固定する方法を採用する。

なお、マイクロホンを固定する方法を採用したとしても、マイクロホン固定治具による反射の影響を完全に無くすることはできないので、できるだけ反射の影響が少ない構造とする。

また、マイクロホンの取り付け位置、角度のずれは校正値に直接影響するため、必要な位置精度とそれを実現するための調整手法を考慮しながら、マイクロホンの固定方法を決定する。

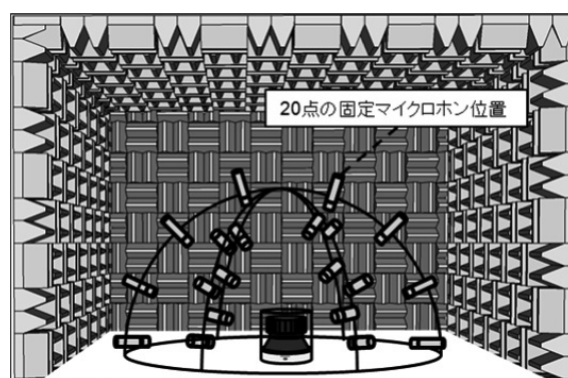


図6.1 半無響室での基準音源の校正

(3) マイクロホンの自由音場感度校正方法の検討

固定法を採用すれば、基準音源を校正するために必要なマイクロホン 20 個を校正する必要がある。

マイクロホンの自由音場感度校正方法には、自由音場感度が既知のマイクロホンとの自由音場における比較校正法 (IEC 61094-8) や⁴⁶⁾、静電アクチュエータによりマイクロホン膜面に静電力を発生させることによる、感度の周波数特性の簡易校正法 (IEC 61094-6)⁴⁷⁾ といった方法がある。自由音場における比較校正では不確かさは小さいが、校正にかかる時間は長い。静電アクチュエータを用いた校正では、不確かさは自由音場における比較校正に比べて大きくなるが必要な時間は短い。多数のマイクロホンを必要十分な精度で、かつ短時間で校正する必要があるため、基準音源校正に必要な精度を考慮した上で、効率の良いマイクロホン校正法を採用する。校正に必要な手順を確立するとともに、得られた自由音場感度の不確かさ評価のために必要な測定を実施する。

(4) 校正値の妥当性評価

基準音源の音響パワーレベル校正値の信頼性を確保するため、半無響室での校正と並行して残響室でも音響パワーレベル校正を実施する。半無響室で校正した基準音源の音響パワーレベルを残響室で校正した場合の値と比較検討し、その差が不確かさの範囲内に収まることを確認することにより校正値の妥当性を評価する。

校正サービス開始後の供給体制としては、依頼試験での供給を想定している。長期的展望としては、基準音源の校正周波数範囲の拡大や不確かさの低減などが考えられる。ユーザの要求を引き続き調査しながら校正サービスを改善していく予定である。

7. まとめ

本稿では、国内で音響パワーレベル標準供給を必要とする背景として、世界での音響パワーレベルの利用の現状、ならびに音響パワーレベルに関連する規制・規格・環境ラベルを調査した結果について述べた。また、音響パワーレベル測定の原理と規格を示し、基準音源の果たす役割とその重要性を明らかにした。基準音源の音響パワーレベル校正に関する標準供給体制について、諸外国の現状ならびに国内における基準音源の校正の現状について述べ、NMIJ が校正サービスを実施する必要性を明らかにした。また、現時点において想定される技術開発要素について述べた。

今後、輸出時に音響パワーレベルの評価を求められる

機器は増加すると考えられ、それに伴い音響パワーレベル測定を行う企業も増えていくと予想される。早急に標準供給体制を整備するとともに、将来的には必要に応じて校正周波数範囲の拡大、校正の不確かさ低減を図る予定である。

謝辞

本調査研究を行うに当たり、日本の音響パワーレベル測定の現状について情報を提供頂きました。日本アイ・ピー・エム株式会社の君塚都夫課長に心より感謝を申し上げます。また、親切に御指導、ご助言頂きました。音響振動科の菊池恒男科長、音響超音波標準研究室の堀内竜三主任研究員、高橋弘宜研究員に心より感謝を申し上げます。

付録

(A) 音源から放射される音響パワーの気温と気圧による変化に関する補正

音源から放射される音響パワーは気温と気圧により変化する。これを考慮した補正項を加えることにより、基準環境条件における音響パワーレベルに補正する。基準環境条件は気圧 B_0 が 1013.25 hPa、気温 θ_0 が 296 K とする²⁵⁾。一般的に、音源から放射される音響パワー W [W] は空気密度 ρ に比例、音速 c に反比例し、以下のよう
に書ける⁴⁸⁾。

$$W = \left(\frac{\rho c_0}{c \rho_0} \right) W_R \quad (\text{A.1})$$

ここで、 W_R [W] は基準環境条件における音響パワー、 ρ_0 および c_0 は基準環境条件における空気密度と音速である。式 (4.7) より、式 (A.1) の右辺は

$$\begin{aligned} \left(\frac{\rho c_0}{c \rho_0} \right) W_R &= \left(\frac{\rho c}{\rho_0 c_0} \cdot \frac{c_0^2}{c^2} \right) W_R \\ &= \left(\frac{400 \sqrt{\frac{314}{\theta}} \cdot \frac{B}{B_0} \cdot \frac{c_0^2}{c^2}}{400 \sqrt{\frac{314}{\theta_0}} \cdot \frac{B_0}{B_0} \cdot \frac{c_0^2}{c^2}} \right) W_R \\ &= \left(\frac{B}{B_0} \cdot \sqrt{\frac{\theta_0}{\theta}} \cdot \frac{c_0^2}{c^2} \right) W_R \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

と変形できる。さらに空気中の音速が絶対温度の平方根に比例することを利用すると、補正値は

$$-10 \log_{10} \frac{B}{B_0} + 15 \log_{10} \frac{\theta}{\theta_0} \quad (\text{A.3})$$

と表すことができる²⁵⁾。

(B) 音波の空気中での吸収に関する補正

音のエネルギーの一部は空気中で熱エネルギーとして失われる。これを音波の空気中での吸収という。吸収に関する補正項は以下のように表される⁴⁹⁾。

$$a(f) \cdot r(1.0053 - 0.0012 \cdot a(f) \cdot r)^{1.6} \quad (\text{B.1})$$

ここで、 r [m] は音源から閉曲面 S までの距離、 $a(f)$ [dB/m] は周波数ごとの単位距離あたりの吸収による音圧レベル減衰量である。 $a(f)$ は気温、気圧、湿度の関数として ISO 9613-1⁵⁰⁾ に算出式が規定されている。

(C) Waterhouse 補正

一般に残響室では室内の壁面近傍で音響エネルギー密度が大きくなる傾向がある。そこで、実際に測定された平均音圧レベルと理論的な拡散音場における室内平均音圧レベルの差の補正を行う。この補正は Waterhouse 補正と呼ばれ、

$$10 \log_{10} \left(1 + \frac{S_R \cdot c}{8 \cdot V \cdot f} \right) \quad (\text{C.1})$$

で表すことができる⁵¹⁾。ここで、 S_R [m²] は残響室内部の全表面積、 V [m³] は残響室の容積、 f [Hz] は測定周波数帯域の中心周波数である。

(D) 音源から出た音が拡散音場を形成するまでの時間に関する補正

式 (4.15) は音源から出た音がすぐに拡散音場を形成するという仮定で成り立っているが、実際には、音源から出た音は、室壁面で反射した後に拡散音場を形成する。そのため、音源から出た音が拡散音場を形成するまでの時間に関する補正が必要である。この補正は、

$$10 \log_{10} e^{-\frac{A}{S_R}} = 4.34 \frac{A}{S_R} \quad (\text{D.1})$$

で表される⁵²⁾。

参考文献

1) 城戸 健一, 基礎音響工学. コロナ社, (1990)

- 2) 子安 勝, 音響パワーレベルとは. 空気調和・衛生工学, 61 巻, 7 号, 1-8 頁, (1987)
- 3) 騒音規制法. (法律第 98 号), (1968)
- 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), (1973)
- 5) 新幹線鉄道騒音に係る環境基準について. (環境庁告示第 46 号), (1975)
- 6) 子安 勝, 音響パワーレベル測定方法規格化の動向. 日本音響学会誌, 41 巻, 5 号, 322-327 頁, (1985)
- 7) Tjeert ten Wolde, 環境騒音に関する欧州の政策と法制. 騒音制御, 30 巻, 2 号, 111-116 頁, (2006)
- 8) 子安 勝, 騒音・振動計測方法の最近の動き. 日本音響学会誌, 46 巻, 5 号, 427-432 頁, (1990)
- 9) JIS Z 8732 音響-音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法-無響室及び半無響室における精密測定方法. (2000)
- 10) ISO 14020:2000, *Environmental labels and declarations -- General principles*
- 11) 平成 18 年度経済産業省委託調査報告書 製品の環境配慮情報提供の在り方に関する調査研究事業報告書. (2006)
- 12) ISO 4872:1978, *Acoustics -- Measurement of airborne noise emitted by construction equipment intended for outdoor use -- Method for determining compliance with noise limits*
- 13) ISO 6395:2008, *Earth-moving machinery -- Determination of sound power level -- Dynamic test condition*
- 14) ISO 7779:2010, *Acoustics -- Measurement of airborne noise emitted by information technology and telecommunications equipment*
- 15) ISO 9296:1988, *Acoustics -- Declared noise emission values of computer and business equipment*
- 16) IEC 60034-9 ed. 4:2007, *Rotating electrical machines - Part 9: Noise limits*
- 17) 財団法人日本環境協会 エコマーク事務局. <http://www.ecomark.jp/>
- 18) 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程. (建設省告示第 1536 号), (1997)
- 19) Directive 2006/42/EC on machinery. (2006)
- 20) Directive 2000/14/EC Noise emission by outdoor machinery. (2000)
- 21) Directive 2010/30/EU Energy labeling of washing machines. (2010)
- 22) The Blue Angel. <http://www.blauer-engel.de/>

- 23) Green seal. <http://www.green seal.org/>
- 24) ENERGY STAR. <http://www.energystar.gov/>
- 25) ISO 3745:2012, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms*
- 26) ISO 3744:2010, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane*
- 27) ISO 3746:2010, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*
- 28) ISO 3741:2010, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for reverberation rooms*
- 29) ISO 3743-1:2010, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources -- Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields -- Part 1: Comparison method for hard-walled test rooms*
- 30) ISO 3743-2:1994, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields -- Part 2: Methods for special reverberation test rooms*
- 31) ISO 3747:2010, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure -- Comparison method in situ*
- 32) ISO 9614-1:1993, *Acoustics -- Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity -- Part 1: Measurement at discrete points*
- 33) ISO 354:2003, *Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room*
- 34) ISO 6926:1999, *Requirements for the performance and calibration of reference sound sources used for the determination of sound power levels*
- 35) P. Francois, Characteristics and calibration of reference sound sources. *Noise control engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 6-15, (1977)
- 36) Physikalisch-Technische Bundesanstalt. <http://www.ptb.de>
- 37) The BIPM key comparison database. <http://kcdb.bipm.org/>
- 38) IEC 61094-2 ed. 2.0:2009, *Measurement microphones - Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*
- 39) IEC 61094-7 ed. 1.0:2006, *Measurement microphones - Part 7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphone*
- 40) IEC 61183 ed. 1.0:1994, *Electroacoustics - Random-incidence and diffuse-field calibration of sound level meters*
- 41) 板本守正, 塩川博義, 送風機の音響パワーレベル測定. *空気調和・衛生工学会論文集*, 76 巻, 51-58 項, (2000)
- 42) 中島一, 油圧シヨベルの極低騒音 (iNDR) と快音化. *建設の施工企画*, 696 号, 29-34 項, (2008)
- 43) M. Vorlander, G. Raabe, Calibration of reference sound sources. *Acustica*, Vol. 81, No. 3, pp. 247-263, (1995)
- 44) Intercomparison on sound power measurements by use of reference sound sources (synthesis report). European Commission ber information applied metrology, (1994)
- 45) 矢野博夫, 橋秀樹, 今井章久, 東山三樹夫, 音響パワーレベル測定方法に関する国内ラウンドロビントの結果について. *日本音響学会誌*, 44 巻, 1 号, 47-52 頁, (1988)
- 46) IEC 61094-8 ed. 1.0:2012, *Measurement microphones - Part 8: Methods for determining the free-field sensitivity of working standard microphones by comparison*
- 47) IEC 61094-6 ed. 1.0:2004, *Measurement microphones - Part6: Electrostatic actuators for determination of frequency response*
- 48) G. H bner, Accuracy considerations on the meteorological correction for a normalized sound power level. *Proc. Inter Noise*, Vol.5, pp. 2996-3000, (2000)
- 49) P. Joppa, L. Sutherland, A. Zuckerwar, Representative frequency approach to the effect of bandpass filters on evaluation of sound attenuation by the atmosphere. *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 44, No. 6, pp. 261-273, (1996)
- 50) ISO 9613-1:1993, *Attenuation of sound during propagation outdoors -- Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*
- 51) R. Waterhouse, Interference patterns in reverberant sound fields. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 27, Issue 2, pp. 247-258, (1955)
- 52) M. Vorlander, Revised relation between the sound power and the average sound pressure level in rooms and consequences for acoustic measurements. *Acustica*, Vol. 81, No. 4, pp. 332-343, (1995)