

音響測定器の自由音場における比較校正の不確かさ

高橋 弘宜*, 堀内 竜三*

(平成18年7月10日受理)

Uncertainty for free-field calibration of sound measuring instruments by comparison

Hironobu TAKAHASHI, Ryuzo HORIUCHI

1. まえがき

計測用マイクロホンやサウンドレベルメータ(騒音計)などの音響測定器の校正における不確かさの要因は、電氣的測定に関係するものと校正用音場に関係するものに分けられる。このうち、電氣的測定が関係する不確かさは、他分野の不確かさ解析手法を参考とすることができるが、音場に関係する不確かさは音響分野特有のものであり技術情報は少ない¹⁾。

校正用音場としては、寸法が波長に比べて充分小さな密閉された空間で、音圧分布が一樣と見なせる音場や、反射や回折なしに音波が自由に伝搬できる音場(自由音場)が用いられる。前者の代表は標準マイクロホンの音圧感度の絶対校正に使用する音響カプラであり、後者は計測用マイクロホンの自由音場感度の校正に使用される無響室である。実際に使用される音場が校正の前提となる理想的状態からずれており、またそれを直接に調べられないことが、音響測定器校正の不確かさの大きな要因となっている。

計測用マイクロホンの自由音場感度やサウンドレベルメータの自由音場レスポンスの校正は、自由音場内を平面進行波のみが伝搬しているとの条件の下で校正が行われる。ここでは、これらの音響測定器を例に取り、自由音場に関係する不確かさ要因を中心に取り上げて考察する。

2. 音響測定器校正における不確かさの要因

図1に音響測定器の校正を行うための典型的な測定シ

* 計測標準研究部門 音響振動科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致しているわけではありません。

ステムのブロック図を示す。音響測定器の校正の特徴は、測定可能な量が入出力電気信号のみであり、音圧やその分布など測定用音場の様子を直接には把握できないことである。

表1に、標準マイクロホンの絶対校正及び校正された標準マイクロホンを用いた音響測定器の比較校正の一覧を示す。1)は音響標準の最も基本となる標準マイクロホンの音圧感度(マイクロホン膜面の音圧に対する出力電圧の比)の絶対校正、2)は標準マイクロホンの自由音場感度(マイクロホンがないときの音場の音圧に対する、マイクロホンを置いたときの出力電圧の比)の絶対校正、3)は音源の音響パワー測定の基準として使用する標準音源の校正、4)は計測用マイクロホンやサウンドレベルメータの検査などに用いる音響校正器の校正、5)は計測用マイクロホンの音圧感度の比較校正、6)は計測用マイクロホンの自由音場感度の比較校正、7)はサウンドレベルメータの自由音場レスポンスレベル(サウンドレベルメータを置かないときの音場の音圧レベルと、サウンドレベルメータを置いたときの表示値の差)の校正である。

この中で、無響室を用いた比較校正は、6)と7)である。サウンドレベルメータについては校正・検査方法がIEC規格とそれと同等のJISとして規格化されているが、計測用マイクロホンの自由音場比較校正方法についてはまだ規格化されていない。

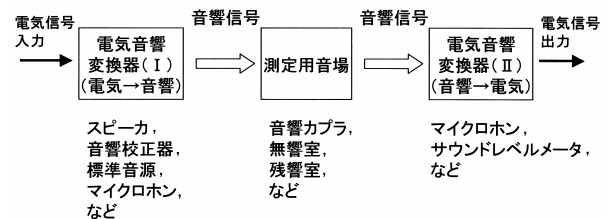


図1 音響測定器の校正を行うための測定系ブロック図

表1 音響計測機器の校正方法の分類

校正対象	音源	測定用音場	受音	規格
1) 標準マイクロホン音圧感度 (相互相反校正法)	標準マイクロホン	音響カブラ	標準マイクロホン	IEC 61094-2 JIS C 5515
2) 標準マイクロホン自由音場感度 (相互相反校正法)	標準マイクロホン	無響室	標準マイクロホン	IEC 61094-3 JIS C 5515
3) 基準音源の音響出力	基準音源	無響室・残響室	計測用マイクロホン	JIS Z 8732, 8734, 8739など
4) 音響校正器の出力音圧	音響校正器	音響カブラ (付属)	計測用マイクロホン	IEC 60942 JIS C 1515
5) 計測用マイクロホン音圧感度	スピーカ	音響カブラや 微小空間	計測用マイクロホン/ 計測用マイクロホン	IEC 61094-5
6) 計測用マイクロホン自由音場感度	スピーカ	無響室	計測用マイクロホン/ 計測用マイクロホン	-
7) サウンドレベルメータ自由音場レ スポンズレベル	スピーカ	無響室	計測用マイクロホン/ サウンドレベルメータ	IEC 61672-1, 2 JIS C 1509-1, 2

注1: 斜体は、被校正器物、太字は基準器(標準マイクロホンや計測用マイクロホン)を示す。

注2: 標準マイクロホンは、IEC 61094-1²⁾で規定されたLaboratory Standard Microphone, 計測用マイクロホンは、IEC 61094-4³⁾で規定されたWorking Standard Microphoneであり、標準マイクロホンも含む。

表2 音響測定器の校正における不確かさ要素

不確かさの要因		備考
1) 電気測定系	電圧	バイアス電圧, 信号電圧
	インピーダンス	マイクロホンの静電容量など
	電圧伝達特性	減衰量, 電圧計のリニアリティ
	クロストーク	電気回路内, 長いケーブル
	電気測定系の雑音	
	歪み	
	周波数	周波数の値, 変動
2) 音響伝搬系	音場の性質	境界の形状・寸法・容量(密閉系), 音源周囲の音場(開放系)
	音場の不完全さ	音圧分布, 反射波, 媒質の不均質性
	媒質	空気, 水素ガスの純度
	環境条件	気圧・気温・湿度の値とその変動, 風
	受音位置	マイクロホンのカブラへの取付(密閉系), 基準器と被校正物の設置位置, マイクロホンの音響中心(開放系)
	暗騒音	
3) 電気音響変換器 (被校正物を含む)	動作条件	駆動電圧, バイアス電圧, 負荷
	環境特性	気圧, 気温
	不安定性, ドリフト	発熱
	個体差	寸法や音響パラメータの違い
4) 理論の不完全性	理論による補正	カブラの熱伝導の理論
5) 物理定数		密度, 比熱比など
6) データ処理	標準条件への補正	被校正物の温度係数, 圧力係数
	丸め誤差	表示の分解能
7) 基準器	基準とするマイクロホンの感度	音圧感度, 自由音場感度
8) その他		測定再現性

一般に、音響測定器の校正における計測の不確かさの要素は、表2ようになる。この中で、2)が音響系に直接関係している要因であるが、4)についても音場の理論的取扱いが不確かさ評価に影響する。

測定用音場のうち、音響カプラに関しては、金属やプラスチックで密閉された空間内の音場であることから、カプラの材質や幾何学的構造・寸法、内部の伝搬媒質、環境条件などから、内部の音場の様子を理論的に取扱うことができる。すなわち、音圧分布が一樣というカプラ校正の前提となる理想的な音場からのずれの影響を、理論的に導出した数値を用いることで補正が可能であり、またその不確かさも推定しやすい⁴⁾。

音響カプラを用いる標準マイクロホンの相互相反校正に関する不確かさは、国際度量衡委員会の音響・超音波・振動諮問委員会CCAUVで行った標準マイクロホンに関する基幹比較結果の最終レポートに各国の国家標準機関が評価した不確かさの表が記載されている⁵⁾。また、現在IEC/TC 29「電気音響」で審議されているIEC規格IEC 61094 Part 2の第2版に、不確かさの要素が載せられる予定である。

しかし、無響室内の音場が自由音場からずれていることの影響は、無響室の音響的性能と音源の音響放射特性など、把握することが難しい要素に関係しており、理論的な取扱いを難しくしている。

3. 自由音場校正における不確かさの要因とその評価方法

3.1 音源から放射される音場

自由音場とは、考えている領域で境界の影響が無視できる音場である。さらに、計測用マイクロホンやサウンドレベルメータの自由音場校正では、被校正物の置かれる位置の音波が「無限に広い均一な媒質中と同等の条件の下に伝わる平面進行波」であることが前提となっている。

無響室が理想的な自由音場を実現していても、その無響室内において音源（スピーカなど）から放射される音波は、振動板の形状・寸法や振動モード、スピーカボックスなどの影響を受けており、音源近傍では複雑な音場となっている。しかし、音源からある程度離れた位置（遠距離音場の領域）では、ほぼ球面波と見なせるようになる。球面波と考えてもよい位置は、音源からの距離を z 、音源の寸法（円形の場合は半径）を a 、波長を λ としたときに、円形ピストン音源前面の音場解析から、

$$z > a^2/\lambda \text{ かつ } z > a$$

と考えられる。遠距離音場領域では、音響インテンシティの値が音源からの距離の二乗に反比例（音圧は距離に反比例）する、いわゆる逆二乗特性を示す。このため、可聴周波数帯域を対象とした音響測定では、音源用のスピーカから0.5～2 m程度の位置に受音点を設定することが多い。

さらに、音源が指向性をもつ場合には、距離が同じでも音源の主軸からずれると音圧が変化する。このように、音源前面の音場は、たとえ遠距離音場領域でも、測定点の周囲には音圧分布を生じている。ただし、受音点に置かれたマイクロホンの振動膜の寸法が波長に比べて小さければ、ある不確かさの下で、振動膜面上では音圧分布は一樣、すなわち平面波を受音していると考えることができる。

3.2 無響室内の音場

無響室は、暗騒音が低くなるように設計された部屋内部の壁、天井、床のすべてに吸音くさびなどの吸音構造を取り付けたものである。しかし、吸音構造は完全な無反射構造ではないことや、無響室内には歩行用の床や音響機器を取り付けるための治具などの反射物体が存在するため、無響室内には音源からの進行波だけでなく反射波も生じている。

無響室内に反射波が存在すると、図2に示すように進行波と反射波の干渉により、音源からの距離に対する音圧の減衰曲線は波を打ち、理想的な逆二乗特性が成立しなくなる。そこで、通常、音源からの距離に対する音圧分布を測定し、逆二乗特性からの偏差を無響室の性能指標として用いている。

観測点における球面進行波の音圧を p_i 、反射波の音圧を p_r とすれば、逆二乗則からの偏差 D は、

$$D = 20 \log_{10} \left(\frac{p_i + p_r}{p_i} \right) = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{p_r}{p_i} \right) \text{ dB}$$

となり、逆二乗特性はほぼ $\pm D$ dBで波打つ。ここで、進行波の音圧は音源からの距離に反比例する一方、反射波は反射物体（壁など）から離れるに従って減衰するので、 D の値は図2のように音源の近くでは小さく、離れるにつれて大きくなる。例えば、 $D = 1$ dBのときには、その場所では音源からの進行波に比べて約12%の大きさの反射波が存在することになる。

なお、低周波数帯域では無響室の寸法が波長に比べて小さいことから、「音波が伝搬する」仮定そのものが成り立たなくなることには留意する必要がある。また、一般には、吸音くさびなどの吸音構造は、設計周波数以下の低

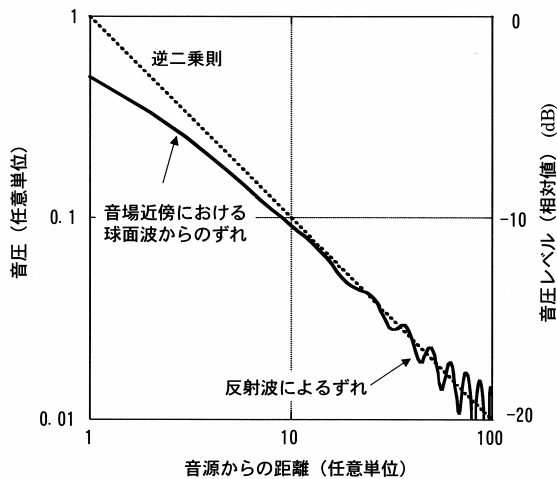


図2 音源周囲の音場における逆二乗特性からのずれ

周波数帯域では反射係数が増大する．この2点から，低周波数帯域においては，無響室内に自由音場を作ることはいできない．

3.3 比較校正における反射波の影響

無響室内で，標準マイクロホンと被校正物を置換することによって比較校正を行う場合を考える．なお，以下の考察においてマイクロホン設置点では，音源からの進行波は平面波とみなすことができると考える．また，計測用マイクロホンの自由音場校正を例に取るが，自由音場感度を自由音場レスポンスとすれば，サウンドレベルメータについても成り立つ．

標準マイクロホンの自由音場感度 M_f は，マイクロホンが音場内におかれる前の測定点における平面進行波の音圧を p_f ，マイクロホンを音場においたときの出力電圧を V_o とすれば，

$$M_f = V_o / p_f \quad (1)$$

で定義される．また，音圧感度は，マイクロホン膜面における音圧を p_p とすれば，

$$M_p = V_o / p_p \quad (2)$$

で定義される．

測定音場においては， $p_f = p_i + p_r$ である．また，進行波の標準マイクロホンによる反射・回折の影響を d_i ，反射波に対する影響を d_r として，マイクロホンを音場内においたときの膜面における音圧を，

$$p_p = p_i(1+d_i) + p_r(1+d_r) \quad (3)$$

とすれば，マイクロホンの出力電圧は，

$$V_o = M_p \{ p_i(1+d_i) + p_r(1+d_r) \} \quad (4)$$

となる．

自由音場感度と音圧感度の関係は，反射波の存在しない自由音場における出力電圧から求めることができる．マイクロホンがないときの音圧 p_i に対して，マイクロホンを置いたときの音圧は $p_i(1+d_i)$ であるから，このときの出力電圧は， $M_f p_i = M_p p_i(1+d_i)$ である．したがって両感度の間には，

$$M_f = M_p (1+d_i) \quad (5)$$

の関係がある．ここで， $(1+d_i)$ をレベル表示した

$$\Delta_{ff} = 20 \log_{10} (1+d_i) \quad (6)$$

を自由音場補正量，あるいは「自由音場感度レベルと音圧感度レベルの差」という⁶⁾．図3に示すように，標準マイクロホンの「自由音場感度レベルと音圧感度レベルの差」は低周波数帯域ではほぼ無視出来るが，高周波数帯域で非常に大きな値となる．

式(4)を自由音場感度で表すと，

$$V_o = M_f \{ p_i + p_r(1+d_r) / (1+d_i) \} \quad (7)$$

と書くことができる．基準の標準マイクロホンと同じ型式の被校正マイクロホンと置換した場合には， d_i や d_r の値は同じなので式(3)が成り立ち，被校正マイクロホンの感度 M'_f ， M'_p に対しても同じ形の式(4)～(7)が成り立つ．出力電圧は，

$$V'_o = M'_f \{ p_i + p_r(1+d_r) / (1+d_i) \} \quad (8)$$

と書けるので，

$$M'_f = M_f (V'_o / V_o) \quad (9)$$

となり，比較校正によって正しく被校正マイクロホンの感度が求められる．

しかし，被校正物が基準マイクロホンと形状の異なる場合には，反射・回折の影響を表す d_i や d_r の値が異なるため，

$$V'_o = M'_p \{ p_i(1+d'_i) + p_r(1+d'_r) \} \quad (4')$$

および

$$M'_f = M'_p (1+d'_i) \quad (5')$$

から，

$$V'_o = M'_f \{ p_i + p_r(1+d'_r) / (1+d'_i) \} \quad (8')$$

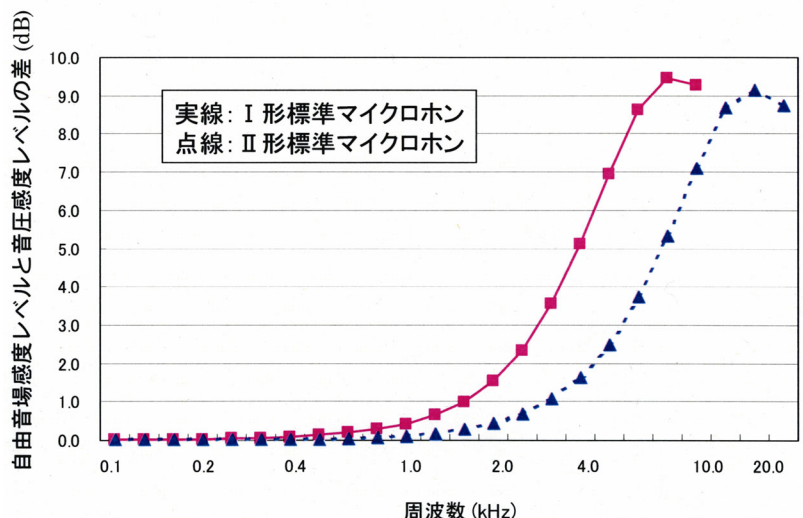


図3 標準マイクロホンの自由音場感度レベルと音圧感度レベルの差

となり，標準マイクロホンと被校正マイクロホンの出力電圧の比は，

$$\frac{V'_o}{V_o} = \frac{M'_f \{1+r(1+d'_r)/(1+d'_i)\}}{M_f \{1+r(1+d_r)/(1+d_i)\}} \quad (10)$$

となる．ここで， $r = p_r/p_i$ である．

したがって，式(9)により電圧比から求めた M'_f の値には，

$$E = \frac{1+r(1+d'_r)/(1+d'_i)}{1+r(1+d_r)/(1+d_i)} \quad (11)$$

程度の誤差が含まれることになる．無響室では r の値が小さいとしても，高周波数帯域では図3に示したように， d_i や d_r の値が非常に大きな値となり得ることに注意が必要である．

以上から，「基準マイクロホンと被校正物が全く同じ形状をもち，かつ，測定時間内に音場の様子が変化しない」という場合を除き，無響室内の反射波の影響は避けられない．

なお， r や d_i ， d_r の値が小さい場合には，式(11)は

$$E \approx 1+r\{(d'_r-d'_i)-(d_r-d_i)\} \quad (12)$$

と近似できる．この式から，音場内の反射波と被校正物による反射・回折の影響は積の形で含まれていること，すなわち，両者の影響は分離出来ないことがわかる．さらには，反射波の位相は音の速さの変化に敏感であるため， r の値は気温の影響を大きく受けることから， E の理論的な取扱いは非常に難しい．

3.4 自由音場校正に関する不確かさの要素とその評価方法

2節で述べた不確かさ要素のうち，自由音場校正における音場に関する不確かさを取り出すと，表3のようになる．

3.4.1 音源の出力変動

音響出力変動は，無響室内の気温変化と音源の温度特性からの計算や，測定値の時間変動から推定する．

表3 音場に関する不確かさ項目（自由音場校正）

不確かさ項目	内容
1) 音源音響出力の安定性	気温
	音源の内部温度上昇
2) 平面波音場の仮定と被校正物の位置	音源の指向特性
	遠距離音場の仮定
	受波面における音圧分布の一様性， 受波位置（音響中心の位置）
3) 進行波の仮定	無響室の寸法
	吸音壁，取付け治具，床などからの反射波
4) 被校正物の安定性	環境変動やプリアンプ温度上昇に伴う感度変化
5) 暗騒音	

通常, スピーカを定常信号で駆動した場合には内部温度の上昇によって, 時間と共に出力が変動する。これは非常に長い時定数を伴う変化であるため, 駆動信号を切った後も履歴が残ることに注意が必要である。

安定な測定のためには,

信号を加えて, 安定状態になってから測定を開始する。

スピーカに大パワーを加えない。

などの方法が取られるが, 最も有効な方法は,

スピーカの前面に, 放射音場を乱さないようにモニタマイクロホンを取付けて, 測定中の音場音圧の変化を補償する。(モニタマイクロホンとスピーカの相対位置は固定する)

ことである。

3.4.2 平面波音場の仮定

測定点における音場が指向性を伴う球面波音場であることの影響は, 音源の放射特性や測定点付近の音圧分布と位置設定ずれから推定する。

なお, 基準器と被校正物の音圧測定点(受波位置)は一致させることが必要である。両者が同じ型式の場合には問題ないが, 異なる場合には受波位置と物理的な位置の不一致が不確かさの原因になる。一般に, 音圧を受ける振動面が有限の大きさをもつため, 電気出力に対応する音圧受波位置は, 「音響中心」と呼ばれる振動膜上からは離れた場所となる⁷⁾。音響中心の位置は, マイクロホンの型式や周波数によって異なり, またその測定は難しいため, 基準器や被校正物の位置設定誤差と一緒に, 不確かさに含める必要がある。

3.4.3 反射波の影響

無響室内で校正結果に影響を与える反射物は, 無響室内装の吸音材, 歩行用の床, 基準器や被校正物を設置するための支持具である。

(1) 繰り返し測定による推定

反射の影響については, 3.3節で述べたように, 無響室内の音場と基準器や被校正物の反射・回折の相互作用の結果であるために, 一方だけの情報から推定することができず, また繰り返し測定結果にも全容は現れにくい。

サウンドレベルメータのJIS C 1509-2⁸⁾には, 自由音場におけるレスポンスの測定を行う場合,

「試験は, 自由音場試験設備内で, 音源とマイクロホンとの間の距離及び配置を適切に変えて, 少なくとも更に2回繰り返す。」

となっている。これは反射波の影響を取り除くための措置であり, 不確かさを評価するためには不十分である。

測定音場の影響による不確かさの大きさを求めるためには, 無響室内で音源と計測用マイクロホン(あるいはサウンドレベルメータ)の位置(相対位置と絶対位置)を変え, 多くの測定データを収集する必要がある。

(2) 周波数領域での推定

反射波の影響を見積もるために, 周波数軸上で調べる方法も効果的である。細かな周波数間隔をもつマルチスペクトル音, あるいは周波数スイープ音で駆動した音源からの音波を受音すると, 反射波が存在する場合にも, 本来なめらかであるはずの周波数特性の場合でも, それに重畳した細かな波打が観測される。反射物体が受音点の後方にある場合, その位置は, 変動周期幅を Δf , 音の速さを c とすれば,

$$d = c/2\Delta f \quad (13)$$

となる。また, 反射波の影響を除くための対策を立てなければ, 周波数特性の波打に相当するばらつきが不確かさとして含まれることになる。例を付録に示す。

(3) 信号処理による不確かさ低減

反射波の影響を不確かさに含ませるのではなく, 波形処理によって反射波の影響を除くことができれば不確かさを軽減できる。

バースト波, パルス波などを用いて直接波と反射波を時間的に分離して取り除く。

(マルチスペクトル音を用いた測定波形を信号処理して反射波を取り除く方法も含まれる)⁷⁾

帯域雑音(帯域マルチスペクトル音), 周波数スイープ波を用いて, 周波数領域で平均化することで反射波の影響を軽減する。

などの方法がある。の方法による反射波の影響の除去効果の例を付録に示す。なお, では, 信号処理に伴う不確かさを考慮する必要がある。また では, 単一周波数における校正値とは異なることに注意する必要がある。

(4) 低周波数帯域

校正物の位置を動かすことで音場の影響による不確かさを見積もる。しかし影響の最大値を把握するためには, 位置関係を波長程度変化させなければならない。また, 周波数軸上で調べる手段においても, Δf と同程度の周波数になると波打は見られない。そこで, 低周波数帯域では, 測定結果だけでなく, あらゆる知見を

表4 無響室内の反射波，被校正物による反射・回折による不確かさ要素の評価

周波数領域	不確かさの評価方法	不確かさの低減方法
低周波数領域 (数百Hz以下)	1) 逆二乗特性と被校正物の反射・回折の大きさから推定 2) 音源と被校正物の位置を変化させて，不確かさを推定	自由音場比較校正に代わり，一様音場内で比較校正を行う．測定空間内の音圧分布の評価が必要．
中・高周波数領域 (数百Hz以上)	1) 逆二乗特性と被校正物の反射・回折の大きさから推定 2) 音源と被校正物の位置を変化させて，不確かさを推定 3) 周波数領域で反射波の影響を評価	反射物体の影響を除く．反射物体として最も影響の大きいのは，校正物を取り付ける支持具である． 反射波を時間的に分離する波形処理方法を採用．

動員して不確かさの推定をする必要がある．

一方，低周波数帯域では被校正物による反射・回折の影響そのものが小さい．もし式(5)の d_i や d'_i の値の小さいこと，すなわち自由音場補正量が十分小さいことがわかっているならば，自由音場感度と音圧感度の差は小さいから，一様音場内での比較によって被校正物の感度やレスポンスを求める方が，結果的に不確かさは小さくなることがある．JIS C 1509-2⁸⁾には，「約250 Hz以下の低い周波数では，密閉したカプラに挿入したマイクロホンを用いて測定した音圧感度は，一般に，自由音場の入射特性に等しいとみなしてよい．」と記載されている．ただし，静電形マイクロホンでは大気圧平衡用の穴がマイクロホンの側面や後方に開いており，低周波数帯域では，この穴から進入してくる音波の影響も考慮しなければならない．そのため，マイクロホンの振動膜部分だけでなく被校正物全体を音場に暴露する必要がある．

マイクロホン同士の音圧比較校正における不確かさについては，IEC 61094-5⁹⁾に記述されている．この場合，測定音場に起因する不確かさ要因は，低周波数帯域では大気圧平衡からの音の進入，高周波数帯域では振動膜上の音圧分布などである．

(5) 不確かさ要素のまとめ

以上の考察を表4にまとめた．

3.4.4 その他の音響系に関する影響

(1) 被校正物の安定性

温度係数や圧力係数の値，繰り返し測定，過去のデータなどから推定する．

(2) 暗騒音の影響

音源を静止させたときに測定値に含まれる雑音成分として現れる．

3.4.5 自由音場における校正に固有な電気系の不確かさ

無響室内部と測定器間で信号の送受を行うため，信号ケーブルが長くなる．このため，次のような不確かさ要素が発生することに注意する必要がある．

- 信号の減衰
- ケーブルの容量
- クロストーク

4. まとめ

音響計測機器の校正に関する測定の不確かさの中で，特に自由音場の影響について説明した．この中で，反射波の影響による不確かさは，測定値のばらつきとして評価するだけでは不十分な場合が多く，また理論的な取扱いも難しい．参考のために，自由音場内で，測定のわずかな手順の差や予期せぬ違いが不確かさに大きく影響する例を付録に載せた．

参考文献

- 1) 佐藤宗純，藤森威：音響計測における不確かさ，日本音響学会誌 59-2 (2003) 88-93.
- 2) IEC 61094-1:2000 Measurement microphones - Part 1: Specification for laboratory standard microphones, IEC(2000)
- 3) IEC 61094-4:1995 Measurement microphones - Part 4: Specification for working standard microphones, IEC(1995).
- 4) R.Horiuchi, T.Fujimori and S.Sato: Uncertainty analysis for pressure sensitivities of laboratory standard microphones, Acoust. Sci. & Tech.,25-5 (2004) 354-363.
- 5) R. Barham: Report on key comparison CCAUV-A-K1, *Metrologia*, 40, Tech. Suppl., 09002 (2003) (レポート本体)

はNPL Report CAIR 02 (2003))

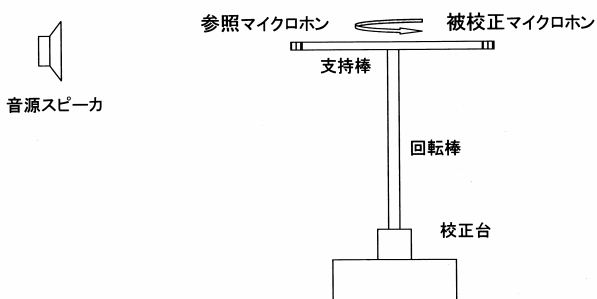
- 6) IEC TS 61094-7:2006 Measurement microphones - Part 7: Values for the difference between free field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones, IEC(2006).
- 7) 藤森威, 堀内竜三, 佐藤宗純: 形標準マイクロホンの音響中心位置の測定, 日本音響学会誌 58-9 (2002) 579-585.
- 8) JIS C 1509-2:2005 電気音響 - サウンドレベルメータ (騒音計) - 第2部: 型式評価試験, 日本規格協会(2005).
- 9) IEC 61094-5:2000 Measurement microphones - Part 5: Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison, IEC(2000).

付録 反射波の影響とその除去方法の例

(1) マイクロホンの取付方法と反射波の影響

形標準マイクロホンの自由音場における比較校正を例として示す。図A1のように、無響室内に音源とマイクロホンの校正台をおく。校正台は、直径約25 mmの回転棒と先端にマイクロホンを取り付ける1対の支持棒（長さ約1m、形マイクロホンと同じ径）から構成されている。

一方の支持棒先端に基準マイクロホン、他方の先端に被校正マイクロホンを取り付ける。まず、基準マイクロホンを音源方向に向け、音源からの音波を受けたときのマイクロホン出力を測定する。次いで、回転棒を180度回転させて被校正マイクロホンを音源方向に向け、マイクロホンの出力を測定する。基準マイクロホンと被校正マイクロホンの電圧の比（レベルで言えば、差）と基準マイクロホンの感度の積（感度レベルで言えば、和）によって被校正マイクロホンの感度が得られる。



図A1 標準マイクロホン自由音場感度の比較校正
(スピーカーとマイクロホン間は2m, 支持棒の長さは1m×2)

図A2は、このようにして得た両マイクロホンの感度レベルの差である。両マイクロホンは同じ型式(B&K 4180)であり、感度レベルの差はなめらかな周波数特性をもたずであるが、測定値には周期100~150 Hz程度の細かな波打が見られる。これは、マイクロホンの後方にある回転棒の影響と考えられる。このままでは測定値に最大で0.5 dB程度の不確かさが含まれることになる。

図A3は反射波対策として、回転棒をグラスウール吸音材で囲った場合の測定値であり、不確かさを半減する効果がある。

図A2や図A3において、一対の支持棒は同じ形状・寸法であり、マイクロホンも同じ型式であるから、3.3節の考察によれば反射波の影響は現れないはずである。しかし現実には、わずかな位置のずれ（おそらく数 mm以内）が原因で、反射波の影響が残っている。

そこで、支持棒を回転させずに固定し、先端のマイクロホンのみを交換する方法に変えて測定された感度レベルの差が図A4である。基準マイクロホンと被校正マイクロホンの出力測定時に条件が異なるのは、両マイクロホンの個体差のみであり、可能な限り同一位置（1 mmより充分小さい）が実現されているので、3.3節の理論の通り、反射波の影響は非常に小さくなる。さらに、回転棒をグラスウールで囲って測定した結果を図A5に示すが、反射波の影響はほぼ完全に除去されている。

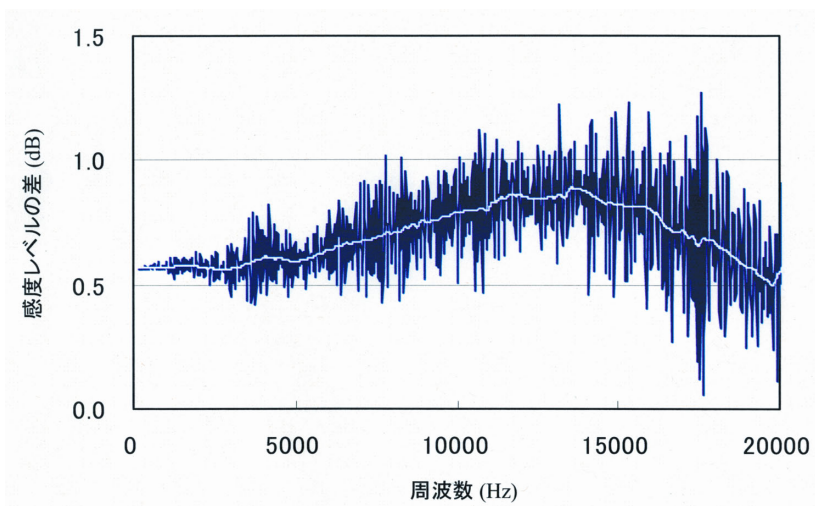
以上、基準と被校正のマイクロホンを同じ位置に合わせることの難しさと、それが達成できれば反射波の影響を低減する効果のあることを示した。

(2) 信号処理による反射波除去の効果

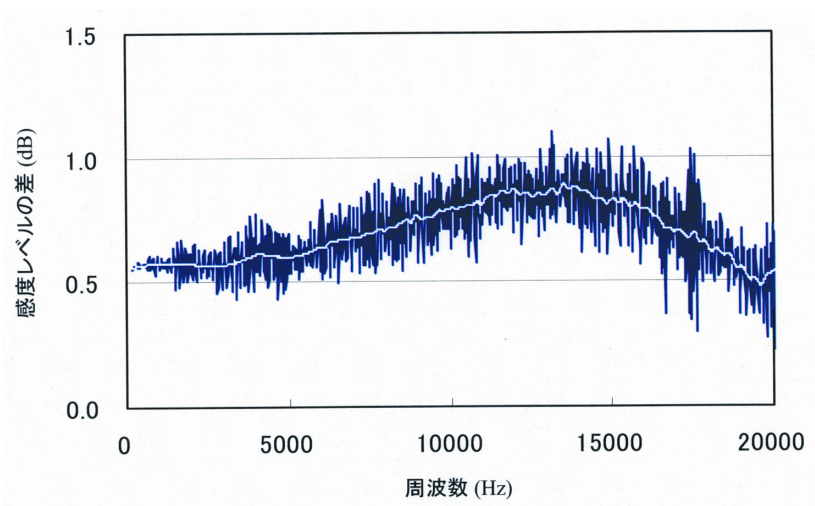
基準器と被校正物が異なる形状や種類の場合には、上述の方法は使えない。しかし、反射波は直接波に比べて時間的に遅れて受音点に到達するから、音源にパルスやバースト波を用いて時間軸上で分離して除去することが可能である。また、音源にマルチスペクトル音を用いて、音源から受音点にいたる伝達関数を周波数軸上で測定した場合には、その逆FFT演算でインパルス応答が得られるから、やはり反射波を時間的に分離・除去することが可能である⁷⁾。

図A2~A4において、波打った特性内に白線で描かれたなめらかな曲線は、S/Nの点から有利な伝達関数法を用いて反射波の影響を除去して測定した感度レベル差である。図A5の場合には両者は重なっており、また反射波の影響が最も大きい図A2の条件でも、反射波の影響のない図A5とほぼ同じ結果（差は0.05 dB以下）が得られている。

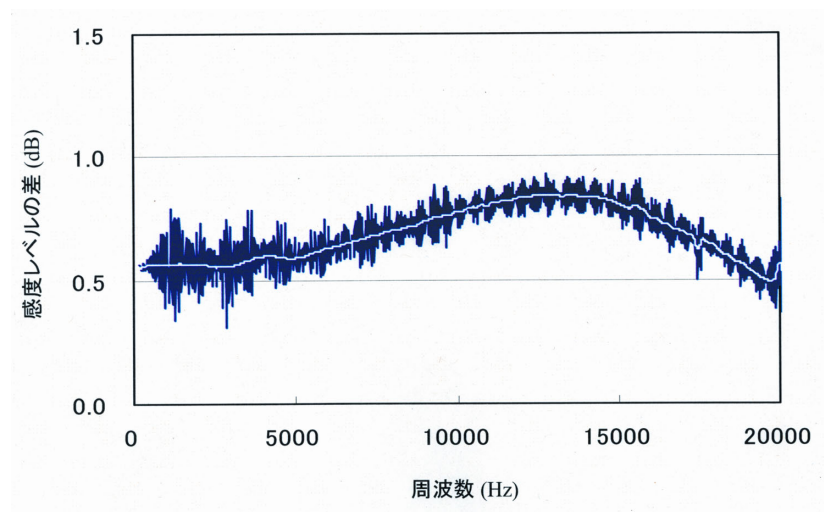
音響測定器の自由音場における比較校正の不確かさ



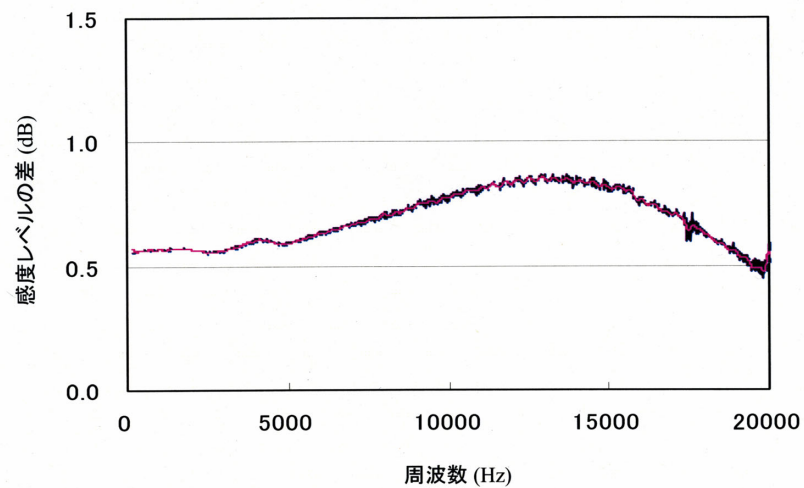
図A2 2つのマイクロホン感度レベル差の測定値
(支持棒の両端に2つのマイクロホンを取り付け、かつ吸音材なし。白線は信号処理による反射波除去を行った結果を示す)



図A3 2つのマイクロホン感度レベル差の測定値
(支持棒の両端に2つのマイクロホンを取り付け、かつ吸音材あり。白線は信号処理による反射波除去を行った結果を示す)



図A4 2つのマイクロホン感度レベル差の測定値
 (支持棒の一方に2つのマイクロホンを順次取り付け, かつ吸音材なし. 白線は
 信号処理による反射波除去を行った結果を示す)



図A5 2つのマイクロホン感度レベル差の測定値
 (支持棒の一方に2つのマイクロホンを順次取り付け, かつ吸音材あり)