

測定用マイクロホンの違いと音場について

By Santiago Rayes



測定用マイクロホンの違いと音場について

By Santiago Rayes, April 2021

はじめに

正確で実用的な測定データを得るためには、環境に適した測定用マイクロホンを選択することが重要です。そのため、測定用マイクロホンは、特定の音場で使用するために設計されています。マイクロホンの違いを理解することは、適切なマイクロホンを選択し、潜在的な測定エラーを回避するのに役立ちます。

一般的に、音場は複雑であるため、マイクロホンとその周囲の音響環境との関係を理解することが重要です。多くの反射や定在波がある音場は、困難を伴います。自由音場であれ、拡散音場であれ、その中間の音場であれ、測定用マイクロホンを適切に選択することで、後処理やデータ解析が非常に容易になります。

このアプリケーションノートでは、3種類のマイクロホンの実用上の違いについて詳しく説明します。

1. 自由音場型マイクロホン
2. 圧力型マイクロホン
3. ランダム入射型マイクロホン

また、このアプリケーションノートでは、測定用マイクロホンがどのように音場を乱すのか、乱れの結果、乱れに基づいて測定結果を修正する方法についても説明しています。

音場の種類

どのような種類の音場が存在するかを判断することは、測定に適したマイクロホンを選び、信頼性の高い結果を得るために重要です。3つの異なる音場について以下に説明します。

自由音場

自由音場とは、反射を引き起こすような物体がない音場と定義されます。したがって、この音場でリスナーに到達する音は、反射の影響を受けない直接音だけです。単一のモノポール音源を仮定すると、音場は明確な方向に放射される単純な平面波に近似することができます。無響室に設置されたラウドスピーカーは、無響室の大きさによって決まる限られた周波数範囲では、自由音場の状態と考えることができます。

圧力音場

圧力音場とは、位相と大きさが全体的に同じである、表面または小さな閉じたチャンバー上の音場と定義されます。これは、風洞の内部、小さな空洞、境界層、音響カプラーなどが考えられます。

拡散音場

拡散音場（ランダム入射音場）とは、音があらゆる方向から等確率で、任意のレベルで、ランダムな位相で到達する音場のことです。これは、多くの物体が多方向に反射を起こしている部屋である可能性があります（規格IEC 61183 サウンドレベルメータのランダム入射と拡散場校正を参照）。実際には、音響試験用の残響室では、限られた周波数範囲で拡散音場を再現しようとしています。

マイクロホンが音場に与える影響

音場に置かれた物体は、その大きさや形状によって乱れを生じさせますがマイクロホンも同様です。標準化されたIEC-61094-4 WS2P ½"圧力型測定用マイクロホンのダイアフラムの直径は約12.6mmです。このマイクロホンが無響室のような自由音場の環境で、周波数特性が平坦な理想的な音源に0°入射している状況を想像してみてください（図1）。

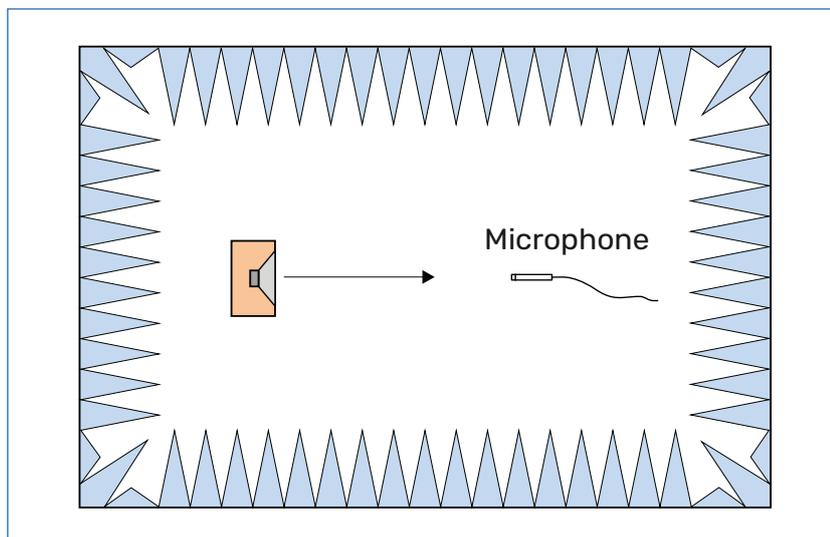


図1
無響室（自由音場環境）内の音源から0°の入射角で向けられた測定用マイクロホン

波長が3.4mの100Hzの正弦波に対して、"1/2"型のマイクロホンには、波長に比べてマイクロホンのサイズが小さいため（図2）、実質的にこの音波からは見えません。

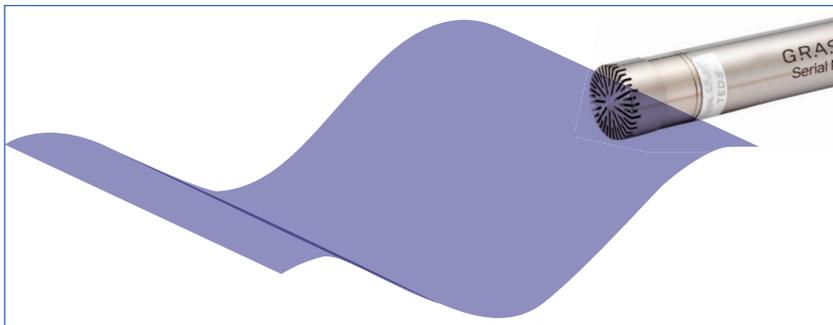


図2
1/2"マイクロホンセットに、波長の長い低周波の音波を当てた場合

基準信号の周波数を上げると、信号の波長が短くなり、マイクロホンの大きさに匹敵するようになります。例えば、10kHzの信号の波長は約34mmです（空気中の音速が344m/sの場合）。この状態ではマイクロホンのダイヤフラム前で回折現象が起こります（図3）。

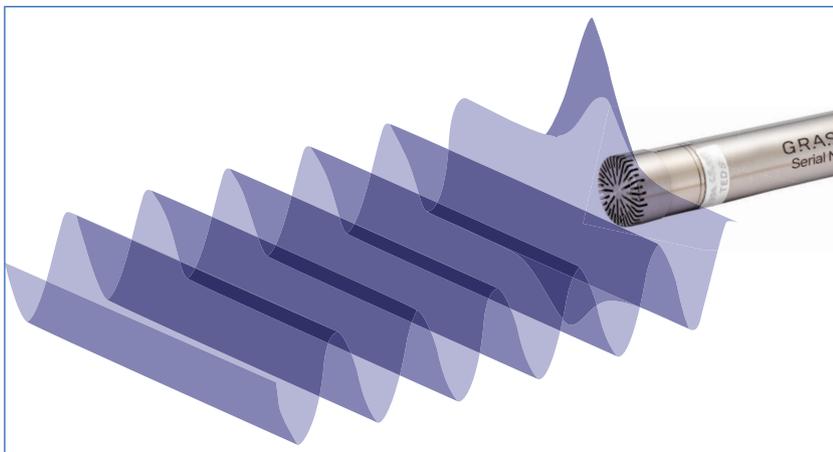


図3
1/2"マイクロホンセットに、波長の短い高周波の音波を当てると回折効果が現れる

この回折効果は、基準信号の波長がマイクロホンの大きさに匹敵するようになると、周波数とともに増加し続けます。この回折効果により、ダイヤフラム前で圧力が上昇し、その圧力上昇がマイクロホンで測定されます（図4）。

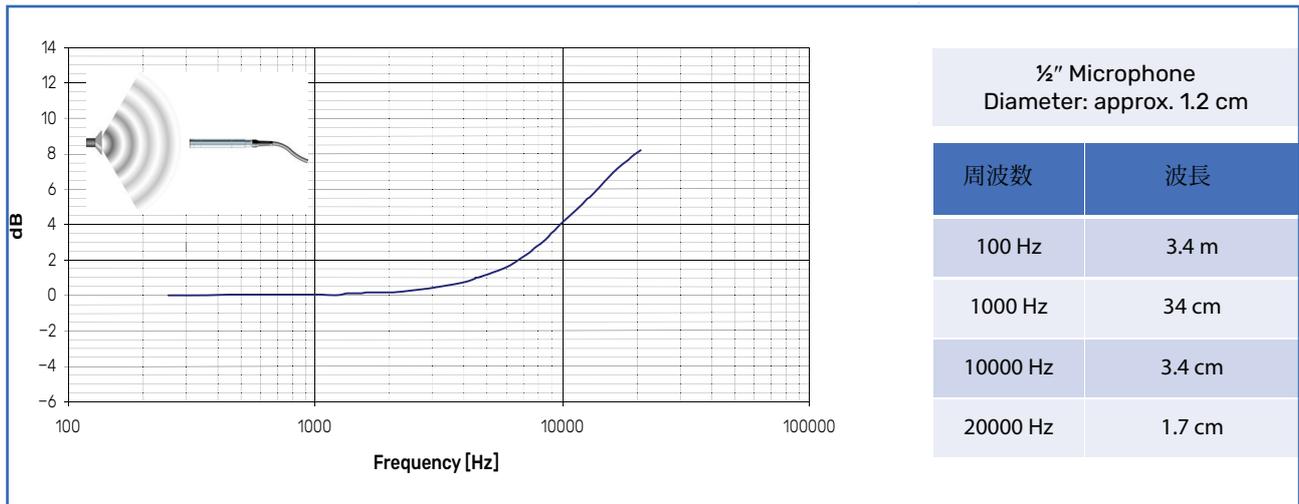


図4- 入射角0°の1/2"圧力型マイクロホンを使用した場合の圧力上昇

周波数が高いほど波長は短くなり、波長が短いほどマイクロホンの大きさと同等になるため、回折効果が大きくなります。回折効果が大きいほど、圧力の増加が測定されます。

ここで重要なのは、測定された圧力の増加は、マイクロホンがこの音場に置かれた結果に過ぎず、音源の周波数特性（この理想的な状況では、周波数特性はフラットです）や反射によるものではないということです（理想的な自由音場では、音源からの音響信号に影響を与える反射はなく、マイクロホンによって測定されます）。

マイクロホンの向き（マイクロホンと音源との間の入射角）と形状は、音場に生じる妨害の量に影響を与えます。マイクロホンのダイヤフラム前の回折効果を減少させ、圧力の上昇を測定する簡単な方法の1つは、マイクロホンを傾けることです。

マイクロホンを（音波の入射角に比べて）傾けると、マイクロホンのカプセルで発生する音の回折が減少します。マイクロホンの傾きが大きいほど、回折効果による圧力の上昇は小さくなります。

図5を見ると、マイクロホンが音源に向かって0°の入射角では、他の角度に比べて振動板での局所的な圧力の高まりが最大になっていることがわかります。一方、音波に対して90°の入射角では、回折効果の影響が少なくなります。

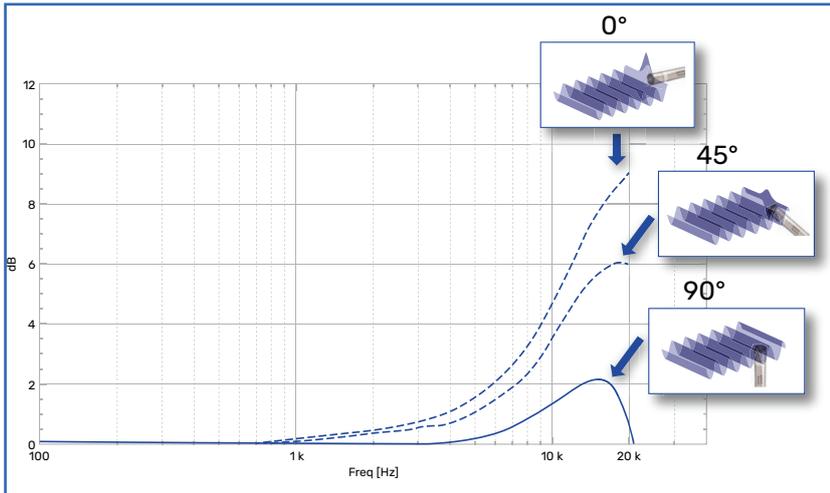


図5
マイクロホンの入射角の変化による圧力上昇の低減

前述したように、回折効果はマイクロホンの大きさと形状に依存します。対象物が大きければ大きいほど、音場への影響は大きくなります。同じ考え方で、物体が小さければ音場への影響も小さくなります。

つまり、1/4"の測定用マイクロホンのような小型のマイクロホンでは、回折効果と圧力の蓄積は、より高い周波数に移動することになります（図6）。

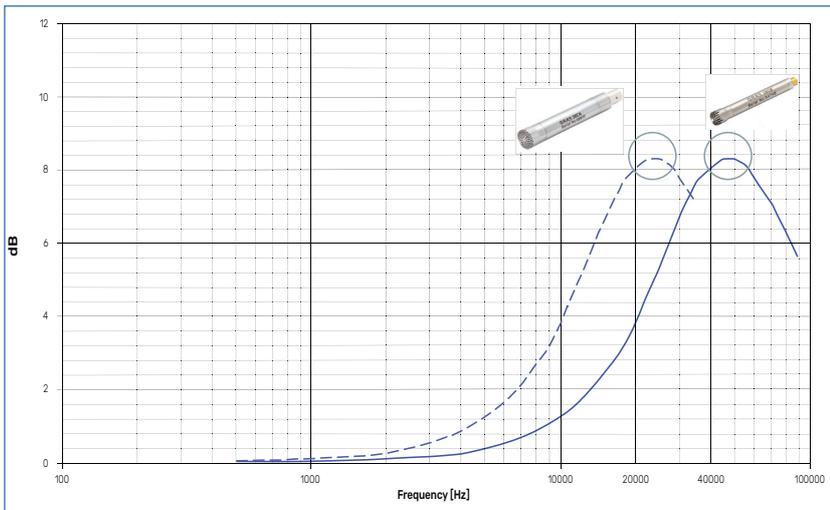


図6
1/2"マイクロホンと
1/4"マイクロホンの
回折効果による音圧上昇

これまでは、回折効果によるマイクロホンの音圧上昇の影響を軽減する方法についてのみ述べてきました。しかし、実際に回折効果をなくすためには、マイクロホンを測定する音場に合わせて選択する必要があります。例えば、自由音場型マイクロホンは、マイクロホンが音場に入る前の音圧を測定するように設計されています。

マイクロホンの種類

前節では、マイクロホンが音場に与える影響について述べました。また、音場の乱れが圧力型マイクロホンでどのように測定されるか、その影響をどのようにして軽減するかを確認しました。また、自由音場型マイクロホンは、特定の状況下で回折効果を除去するのに役立つことを紹介しました。市場で販売されている主な3種類の測定用マイクロホンについて説明します。

圧力型マイクロホン

圧力型マイクロホンは、マイクロホンダイヤフラムの表面にかかる実際の音圧を測定するように設計されています。つまり、マイクロホンが音場を乱して回折効果を起こしていると、マイクロホンがそれを測定してしまい、測定結果に影響が出てしまうのです。

そのため、圧力型マイクロホンは一般的に、境界（例えば図7のような壁）に取り付けられたり、イヤースミュレーターのように密閉されたボリュームの一部として取り付けられたりします。このように小さな空洞内の音圧や、境界自体の音圧を測定します。

自由音場型マイクロホン

先ほど説明したように、音場の中に物体を置くと、音場に何らかの局所的な乱れが生じます。自由音場型マイクロホン（図8）は、音場内の存在を補正し、あたかもマイクロホンが存在しないかのように音圧を測定するように設計されています。自由音場型マイクロホンは、マイクロホンが音場に導入される前の状態の音圧を測定するように設計されているため、音場に生じる妨害を補正することができます。理想的には、マイクロホンの存在が測定に影響を与えないことです。

自由音場型マイクロホンは、ダイヤフラムの手前で音圧が増加するのと同じ量だけマイクロホンの感度が低下するように設計されています（回折効果による）。この感度と音圧の関係は、マイクロホンカートリッジの内部音響減衰を大きくすることで得られます。その結果、マイクロホンからの出力は、マイクロホンが音場に導入される前の音圧に比例することになります。

言い換えれば、マイクロホンがどのように音場を乱しているかが正確に分かれれば、その乱れを補うような周波数特性でマイクロホンを設計することができます。

図9の青色の曲線は、圧力型マイクロホンを音源に直接向けた場合に発生する典型的な圧力上昇を示しています（回折効果による）。黒色の曲線は自由音場型マイクロホンの音圧反応を示しています。自由音場型マイクロホンの音圧反応は、高周波数での音圧上昇を補正するために減衰しています。したがって、自由音場型マイクロホンを自由音場（無響室など）で使用し、マイクロホンを音源に直接向ける（0°入射）と、マイクロホンの周波数応答は平坦になります（赤い曲線）。



図7
音源に対して0°の角度で境界に取り付けられた圧力型マイクロホン



図8
音源に対して0°の角度の自由音場型マイクロホン

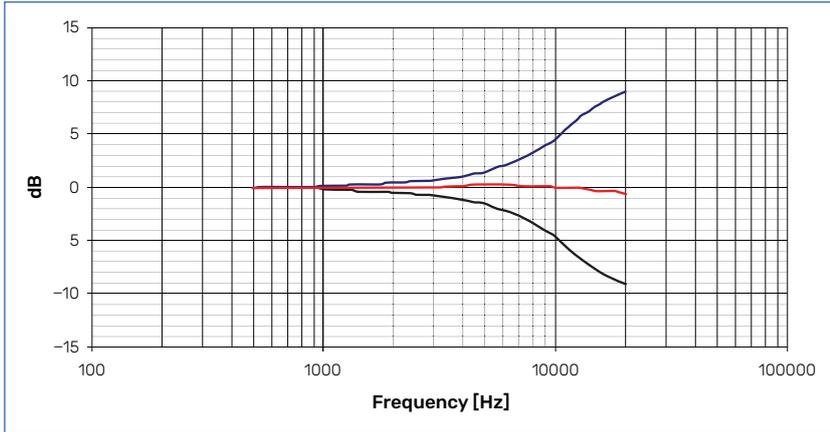


図9
1/2"自由音場測定用マイクロホンの典型的な圧力応答（黒）、自由音場補正（青）、最終的な自由音場応答（赤）。

ここで重要なのは、この補正は、音源からの入射角が0°の自由音場環境でのみ機能するという事です。自由音場型マイクロホンは、理想的な自由音場の状況でなくても、多くのアプリケーションで音響測定の標準マイクロホンとして定着しています。

ランダム入射型マイクロホン

拡散音場ではすべての方向から同じレベルで音が来るので、ランダム入射型のマイクロホンを使用します。これは、残響室や多くの反射面を持つ空間で可能です（図10）。

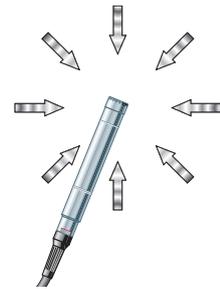


図10
全方向から音が聞こえてくる様子を描いたランダム入射型マイクロホン

自由音場型マイクロホンと同じ考え方で、図11の青色の曲線は、圧力型マイクロホンを音源に直接向けたときに生じる典型的な圧力上昇を示しています（回折効果による）。

赤色の曲線は、ランダム入射型マイクロホンの音圧応答を示しています。ランダム入射型マイクロホンの音圧応答は、高周波での音圧上昇を補うために減衰しています。そのため、残響室などの拡散した場でランダム入射マイクロホンを使用すると、フラットな周波数特性になります（黒い曲線）。

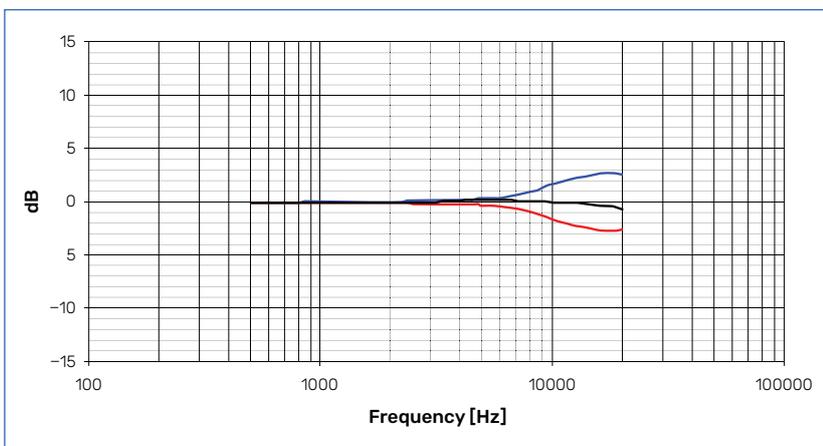


図11
1/2"自由音場測定用マイクロホンの典型的な音圧応答（赤）、拡散音場補正（青）、最終的なランダム入射応答（黒）。

マイクロホンの種類による違い

3種類の異なるマイクロホンは、それぞれ異なる設計目標を持っていますが、それはマイクロホンの周波数特性を見れば一目瞭然です。

圧力型マイクロホンだけでなく、自由音場マイクロホンやランダム入射型マイクロホンでも音圧を測定することができます。



図12
GRASの静電アクチュエータの校正セットアップ

圧力型マイクロホンの圧力応答と自由音場型およびランダム入射型マイクロホンの音圧応答を比較すると、自由音場型とランダム入射型では高周波数の出力が低いことがわかります（図13）。

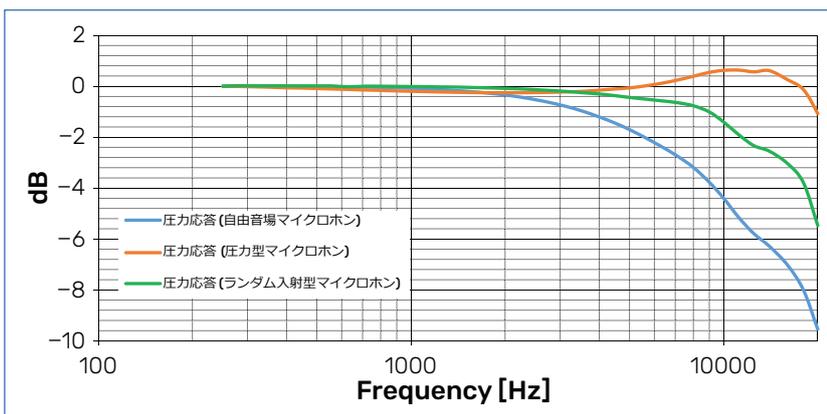


図13
圧力型マイクロホンと自由音場マイクロホン、ランダム入射型マイクロホンとの音圧周波数応答比較の例。

最後に、マイクロホンの自由音場型またはランダム入射型の周波数特性は、測定された音場の特性に補正を加えて得られます。つまり、それは（測定ではなく）計算された周波数応答なのです。

典型的な圧力応答

このセクションでは、3種類のマイクロホンの音圧反応を適切な補正值とともに示しています。例えば、圧力型マイクロホンを自由音場で使用した場合、測定された応答は、回折効果による圧力の上昇のために、高周波数でレベルが上昇します。

自由音場型マイクロホン

静電アクチュエータ方式で得られた自由音場型マイクロホンの典型的な圧力応答を図14に示します。自由音場型マイクロホンの音圧応答（青色の曲線）は、図14の緑色の曲線で示される自由音場補正と一致して、高い周波数でロールオフしています。自由音場補正は、回折効果によって生じる音圧の上昇を表しています。

自由音場型マイクロホンを音源から0°の位置に設置して自由音場で測定した場合、音圧反応（青の曲線）に自由音場補正（緑の曲線）を加えると、オレンジの曲線になります。

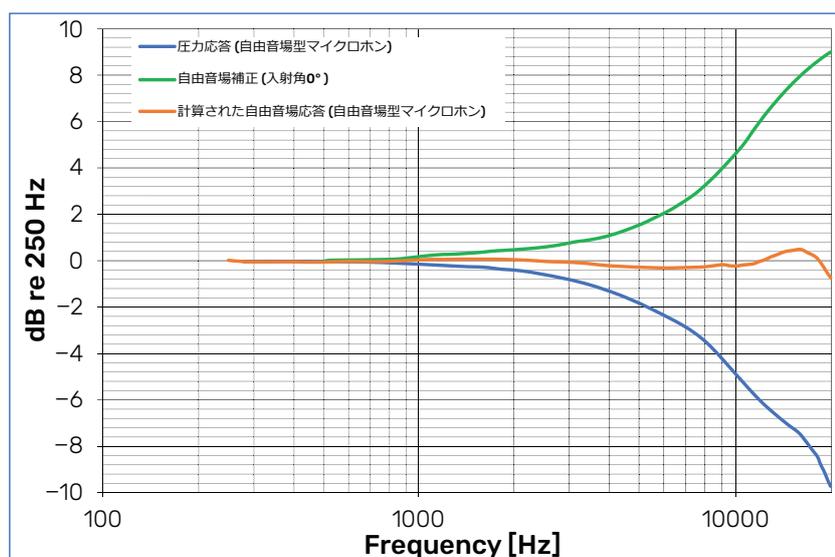


図14
自由音場型マイクロホンの圧力応答（青）、自由音場補正（緑）、計算された自由音場応答（オレンジ）の圧力音場での応答。

圧力型マイクロホン

図15は、静電アクチュエータを用いて得られた、一般的な1/2圧力型マイクロホンの典型的な圧力応答のグラフです。このケースでは、補正は行われていません。

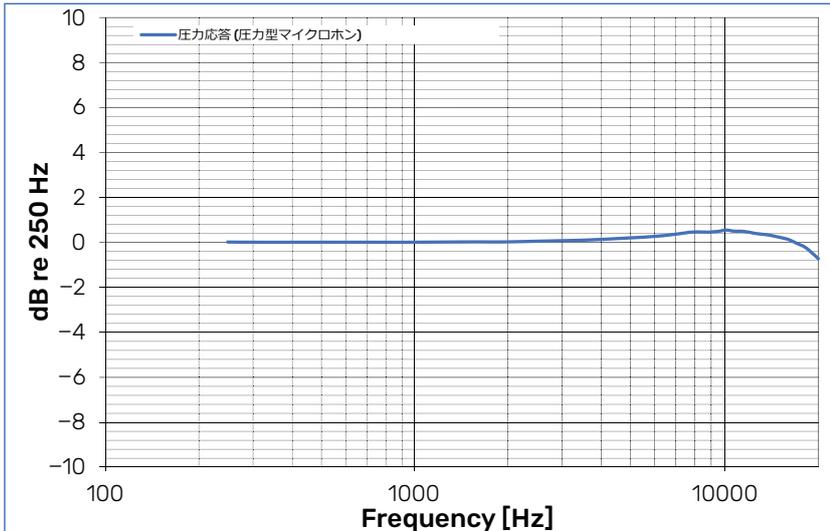


図15
圧力型マイクロホンの圧力応答

ランダム入射型マイクロホン

一般的なランダム入射型マイクロホンの典型的な音圧反応を図16に示します。紺色の曲線はランダム入射補正を示しており、灰色の曲線は拡散音場で計算された応答を示しています。ランダム入射補正は、回折効果による圧力の上昇を表しています。

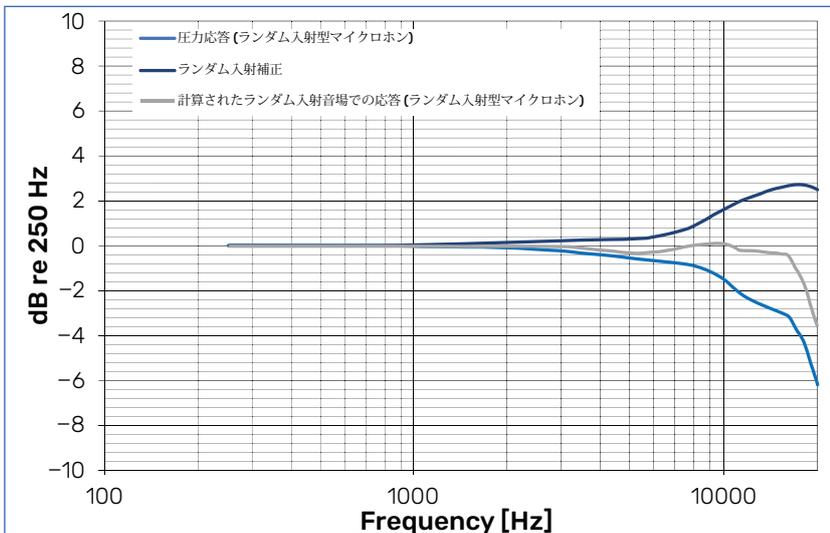


図16
ランダム入射型マイクロホンの音圧応答、補正曲線、およびランダム入射場での計算された音圧反応

自由音場補正とランダム入射補正

ほとんどのGRAS測定用マイクロホンには、自由音場補正とランダム入射（拡散音場とも呼ばれる）補正が用意されています。これらの値は、特定のマイクロホンが、回折効果によってどのように音場を乱すかを示しています。

マイクロホンの自由音場補正*を得るためには、被測定物であるマイクロホンを自由音場環境に置き、よく知られた基準信号（対数正弦波掃引など）に曝す必要があります。

*ほとんどのGRASマイクロホンの自由音場補正とランダム入射補正はgrasacoustics.comで確認できます。

マイクロホンはまず、よく知られた周波数特性を持つ基準音源から0°の入射角に向けられます（図1）。テストの対象となる周波数範囲は、マイクロホンの周波数範囲とそのサイズによって異なります。

例えば、GRAS 46BE 1/4"自由音場型マイクロホンセットの周波数範囲は4 Hzから80 kHzですが、このセットでは、2 kHz以下では0.09 dB以下の音圧上昇（回折効果による）が生じ、500Hz以下では全く妨害が生じません。

0°入射の結果が得られれば、マイクロホンや音源を回転させて、異なる角度の結果を得ることができます。現実の世界では、完全にフラットな周波数特性を持つ音源は存在しないため、補正する必要があります。

この場合、音源の周波数特性ではなく、マイクロホンによる音場の乱れが問題となります。どの偏差がマイクロホンの音場への影響によるもので、どの偏差がフラットでない音源の応答によるものかを区別するためには、同じ測定手順を、より小さなマイクロホンを使って繰り返す必要があります。

小型のマイクロホンを使用すると、回折効果がより高い周波数に移動するため（図6参照）、音源の周波数特性を正確に評価することができ、非平坦性を補正することができます。

上述の手順を拡散音場環境（残響室など）で再現することで、測定用マイクロホンのランダム入射補正值を得ることができます。自由音場補正とランダム入射補正は、通常2つの特定の目的のために使用されます。

オプション 1

静電アクチュエーター法は、その利便性と実装の容易さから、測定用マイクロホンの音圧周波数応答を得るために用いられる最も一般的な方法の1つです。自由音場型やランダム入射型のマイクロホンを校正する場合、まず音圧応答を測定し、次に音圧応答に自由音場/ランダム入射の補正を加えて自由音場/拡散音場応答を算出します（図17~19）。

計算された自由音場応答 = 測定された圧力応答 + 自由音場補正

計算されたランダム音場応答 = 測定された圧力応答 + ランダム音場補正

例：

GRAS 40AE 1/2"自由音場型マイクロホンカプセルを校正する場合、音圧反応は-0.40 dB @ 2 kHz (250Hzを基準)です。そのマイクロホンの自由音場補正 (2kHz, 0°入射) が0.46dBの場合、自由音場応答は次のように計算されます。

計算されたの自由音場応答 (@2kHz, 入射角0°) = -0.40dB + 0.46dB
= 0.06dB (250Hz基準)

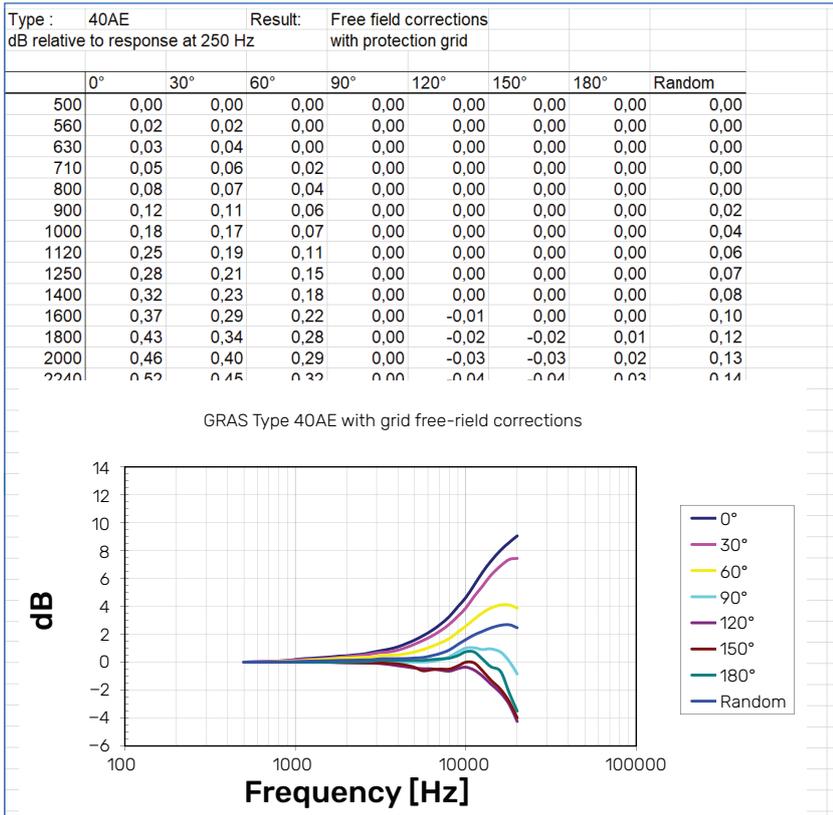


図17
GRAS測定用マイクロホンの異なる入射角における典型的な自由音場補正チャート。ランダム入射の補正も示しています。

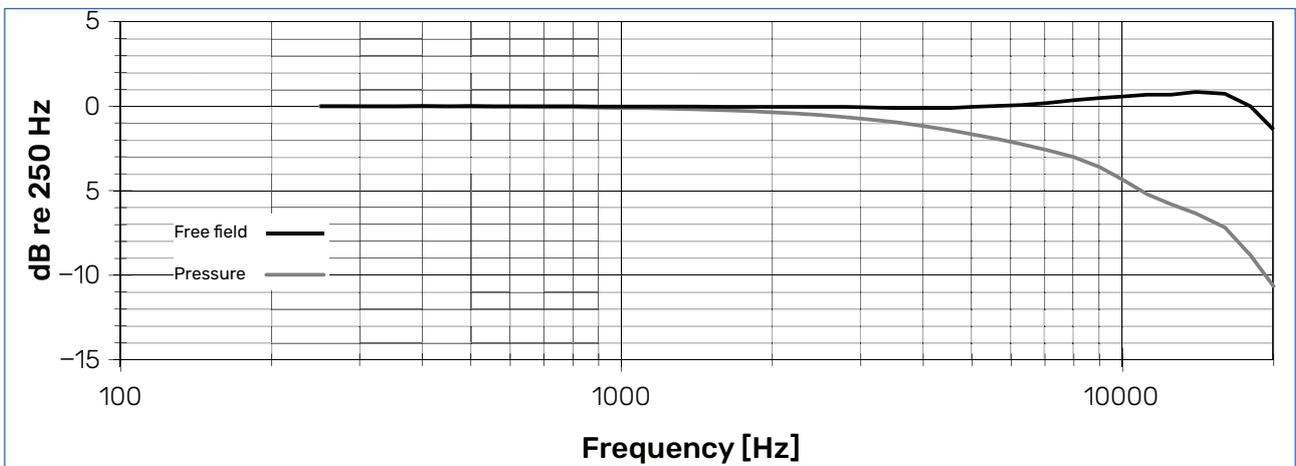


図18 - 自由音場測定用マイクロホンの圧力応答の測定値と計算された自由音場応答

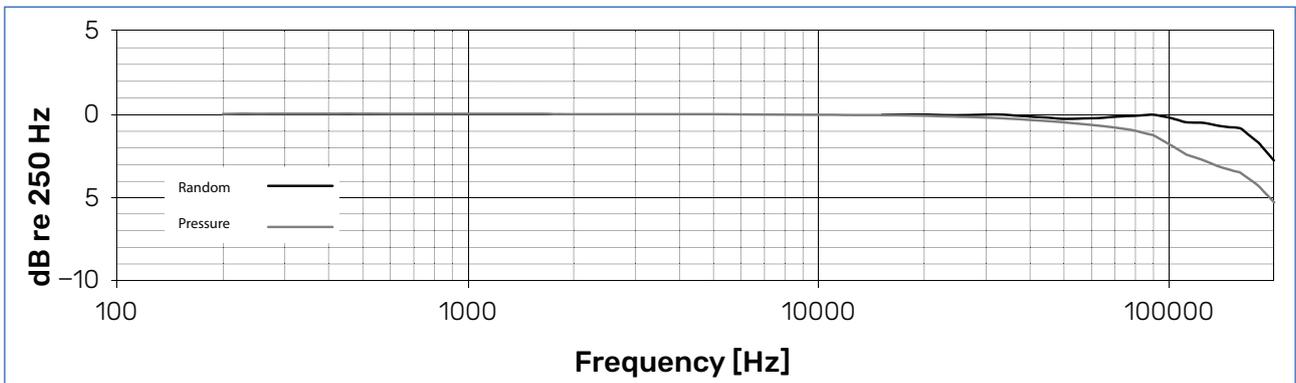


図19 - ランダム入射型マイクロホンの典型的な周波数特性。上側の曲線は拡散音場（ランダム入射）における周波数応答の計算結果、下側の曲線は音圧応答。

オプション 2

圧力型マイクロホンを自由音場/拡散音場の環境で使用した場合、回折効果によって圧力が上昇し、マイクロホンによって測定されることとなります。

その圧力型マイクロホンに対して自由音場/ランダム入射補正を行うことで、測定データを処理して、回折効果による圧力の蓄積を取り除くことができます。こうすることで、後処理されたデータは、自由音場/ランダム入射のマイクロホンで測定した場合と同じになります。

補正された応答 = 自由音場環境における圧力型マイクロホンの測定データ - 自由音場補正

補正された応答 = 拡散音場環境における圧力型マイクロホンの測定データ - 拡散音場補正

例:

GRAS 46AO 1/2"圧力型マイクロホンを自由音場環境で音源から60°の入射角で設置し、10kHzで75dBを測定。GRASが提供する46AOの自由音場補正を使用したところ、10kHz、60°の入射角で2.09dBの補正が得られました。

補正後のレスポンスは以下のように計算されます：

補正後のレスポンス (@10kHz、入射角60°) = 75dB - 2.09dB = 72.91dB

次に、全周波数帯域における補正されたレスポンスを計算します。

測定誤差

マイクロホンの種類の違いは、必ずしもそれほど明白ではありません。例えば、「1/2"自由音場型マイクロホン」と「1/4"圧力型マイクロホン」の違いを意識することが大切です。

例えば、図14に示すように、典型的な1/2"の自由音場型マイクロホンと典型的な1/2"の圧力型マイクロホンの周波数10kHzまでの音圧反応の差は、最大で約4dBにもなります。

つまり、自由音場型マイクロホンの代わりに誤って圧力型マイクロホンを使用すると、測定誤差が生じる可能性があるということです。しかし、測定誤差を許容できる場合や、回折効果が小さい周波数でマイクロホンを使用する場合には、マイクロホンの種類による差は無視できるほど小さくなります。

しかし、間違ったマイクロホンを選んでしまったらどうなるでしょうか？ 図20~図22では、3つの音場に3種類のマイクロホンを並べています。それぞれの音場で、1つのマイクロホンは正しく測定し、他の2つのマイクロホンはある程度の誤差があります。このように比較することで、起こりうる誤差の大きさを簡単に把握することができます。

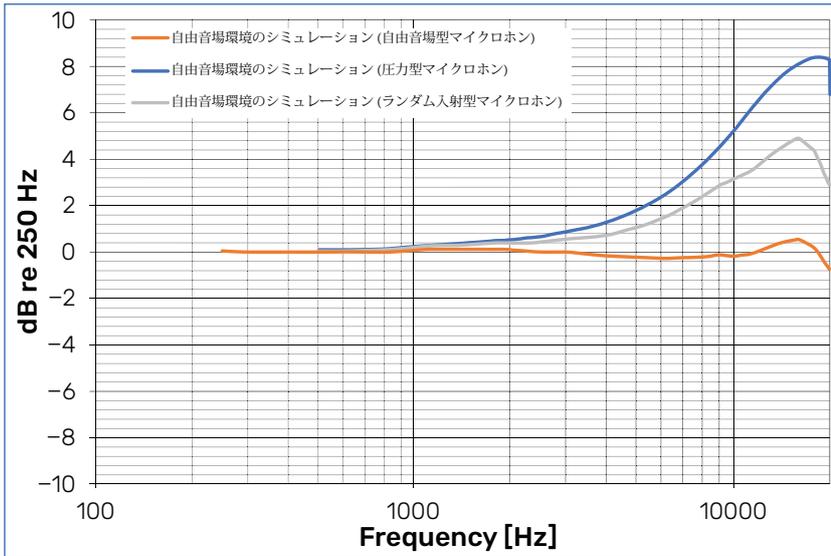


図20
自由音場環境のシミュレーションで自由音場型マイクロホン、圧力型マイクロホン、ランダム入射型マイクロホンの圧力応答の違いを示しています

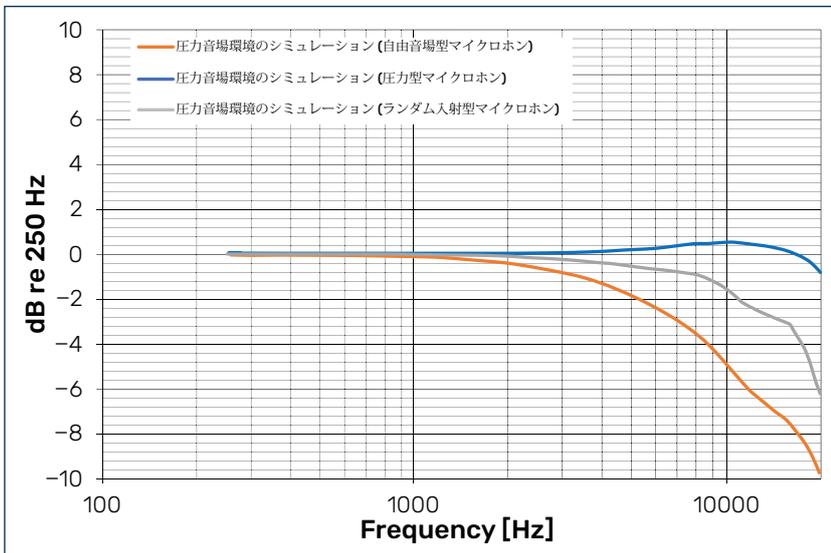


図21
圧力音場環境のシミュレーションで自由音場型マイクロホン、圧力型マイクロホン、ランダム入射型マイクロホンの圧力応答の違いを示しています

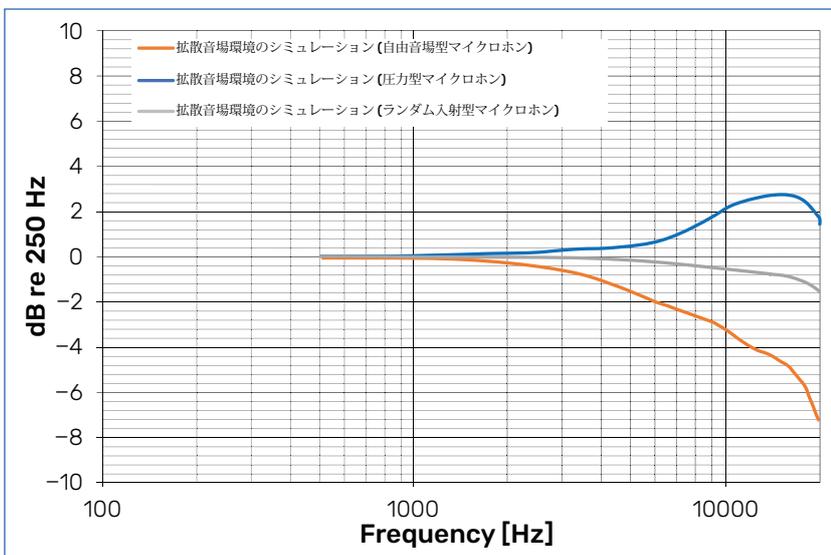


図22
拡散音場環境のシミュレーションで自由音場型マイクロホン、圧力型マイクロホン、ランダム入射型マイクロホンの圧力応答の違いを示しています

表1 は、マイクロホン間の典型的な音圧反応の違い (dB) を示しています。

	低 (250 Hz)	中 (2.5 kHz)	高 (10 kHz)
自由音場-圧力	0 dB	-0.7 dB	-5.4 dB
自由音場-ランダム	0 dB	-0.4 dB	-3.2 dB
圧力-ランダム	0 dB	0.2 dB	2.0 dB

結論

自由音場の環境で音源の0°入射に向けて圧力型マイクロホンを設置すると、20kHzで最大約9dBの音圧上昇が発生します (図20)。そのため、測定に使用したマイクロホンの種類を知ることが非常に重要です。

通常、自由音場型マイクロホンと圧力型やランダム入射型マイクロホンを識別するための視覚的な手がかりはありませんので、マイクロホンのデータシートを確認する必要があります。テストに使用される機器をよりよく理解することで、より信頼性の高い、つまり有用な測定データが得られます。

表1

自由音場型マイクロホン、圧力型マイクロホン、ランダム入射型マイクロホンの低、中、高周波数帯域における音圧応答の典型的なレベル差。



お問い合わせ先

丸文株式会社

E-mail: gras@marubun.co.jp

〒103-8577

東京都中央区日本橋大伝馬町8-1

システム営業第1本部 営業第1部 計測機器課

TEL: 03-3639-9881

中部支社

〒450-0003

愛知県名古屋市中村区名駅南1-17-23

システム営業第1本部 営業第3部 システム営業第2課

TEL: 052-563-1181

GRAS Sound & Vibration
Skovlytoften 33, 2840 Holte, DK

gras@grasacoustics.com
+45 4566 4046
grasacoustics.com

お問合せ先

丸文株式会社

〒103-8577

東京都中央区日本橋大伝馬町8-1

システム営業本部 営業第1部 計測機器課

E-mail: gras@marubun.co.jp

TEL: 03-3639-9881

GRAS Sound & vibration