

# GRAS & Vibration



# ラウドスピーカー 電気音響測定

APPLICATION NOTE

# はじめに

今回のアプリケーションノートでは、ラウドスピーカードライブユニットとラウドスピーカーシステムの 性能を特徴付けるために使用される主要な電気音響測定の概要を提供します。最も重要な客観的 な測定値に焦点を当て、ガイダンスとして業界標準を参照しています。

電子オーディオ試験と比較して、スピーカーの測定は複雑です。まず、サウンドレベルを正確に測 定するには、対象の周波数範囲で既知の安定した感度とフラットな周波数応答を備えた精密測定マ イクロホンとそれをサポートする電子機器が必要です。測定は、テスト対象のラウドスピーカーとテ スト環境との相互作用によってさらに複雑になります。理想的には、DUT から放射される直接音を、 壁、床、天井などからの反射による汚染なしで測定したいと考えています。そのために無響室と呼 ばれる特別な部屋がありますが、非常に高価です。また、最高のものでさえ、最低周波数で完全に 無響ではありません。

物理的な寸法も音響において非常に重要です。可聴周波数範囲は、一般的に 20 Hz ~ 20 kHz と 考えられています。室温の空気中の音の波長の対応する範囲は、17.2 m から 17.2 mm (56 フィー トから 0.68 インチ)です。したがって、20 Hz では、一般的なラウドスピーカーは音の波長に比べて 小さく、点音源のように動作し、すべての方向に均一に放射します。20 kHz ではその逆です。典型 的なラウドスピーカーは波長に比べて大きく、その放射パターンはすべての方向で根本的に異なり ます。さらに、20 kHz での波長は、一般的な測定用マイクロホンの直径 (12.7 mm または 1/2 イン チ)に近いため、測定はマイクロホンの位置のわずかな変化に対して非常に敏感です。

課題はありますが、高品質のテスト機器を使用して推奨される手順に従えば、良好で再現性のある ラウドスピーカー測定を行うことができます。

以下のラウドスピーカー測定はこのアプリケーションノートに含まれています。

- ➢ Frequency response(周波数応答)
- ➢ Sensitivity(感度)
- ➢ Input voltage/power(入力電圧/電力)
- 》 Impedance & Thiele-Small parameters(インピーダンス& ティール・スモールパラメーター)
- ➢ Directivity (指向性)
- 》 Distortion (歪み)

Application Note:

2

# AD GRAS

# 業界標準規格

理想的には、規格は、測定条件と、デバイスが有意義で再現可能な方法でテスト されることを保証するのに役立つ推奨プラクティスに関する業界の専門家の間の コンセンサスを表しています。ラウドスピーカーの測定をカバーする主要な国際 規格は、IEC 60268-5、サウンドシステム機器、パート 5: ラウドスピーカーです。 この規格は、パッシブラウドスピーカードライブユニットとパッシブ ラウドスピーカ ーシステムのみに適用されます。アンプ内蔵のラウドスピーカーには適用されま せん。現在、プロ用オーディオとコンシューマ スペースの両方でパワードスピーカ ーが広く使用されていることを考えると、IEC 60268-5 が改訂される予定です。

IEC ラウドスピーカー測定基準を改訂する作業は進行中です。IEC 60268-5 を 維持するチームは、ドイツ、アメリカ、中国からのラウドスピーカー関連規格に関する 3 つの異なる提案に関連して、規格の改訂を調査するプロジェクトを持っています。 ドイツの提案は、音響測定用と電気的および機械的測定用の 2 つの別個の規格を 作成することです。音響測定規格はドラフト形式(IEC 60268-21)であり、電気的/ 機械的測定は IEC 60268 標準グループのパート 22 になります。コンシューマ テクノロジー アソシエーション(CTA)からの米国の提案は、家庭用 Hifi ラウド スピーカーの標準に関するものです。これにより、上記の 2 つの規格の一部を 参照する IEC 61305-5 が大幅に改訂される可能性があります。中国の提案は マイクロスピーカー(IEC 53034)をカバーしており、これは従来のラウドスピーカー とは技術的に異なります。

IEC 60268-5 は、上記の新しい規格が発行された後に決定されます。それまでの間、ラウドスピーカー・ドライブ・ユニットおよびラウドスピーカー・システムの音響的および電気的測定を行うための有用な基準として役立ちます。

Application Note:

3

# AD GRAS

# 周波数応答

周波数応答は伝達関数測定です。DUT の場合、単位入力あたりの DUT からの 出力の振幅と位相を周波数の関数として表します。多くの場合、デバイスは周波 数応答曲線の形状に関して比較されます。これは通常、(位相ではなく) 振幅応答 のみを参照し、さらに振幅を基準値に正規化します。たとえば、応答の大きさは、 正規化された曲線が1kHz で0dBを通過するように、1kHz などの基準周波数 での値に正規化される場合があります。ラウドスピーカーの場合、DUT からの出 力は、空間のある点で測定された音圧です。パッシブラウドスピーカーの場合、 DUT への入力は増幅された電圧信号であり、パワード スピーカーの場合は、増 幅されていない電圧またはデジタル オーディオ信号 (S/PDIF、HDMI、または Bluetooth などのデジタル オーディオ インターフェイスを介して送信される)であ る可能性があります。

オーディオ エンジニアは通常、設計においてフラットな周波数応答を目指して努 カし、ソース マテリアルが忠実に録音され、スペクトル色付けなしで再現されるよ うにします。電子オーディオ コンポーネントでは、フラットな周波数応答が標準で あり、簡単に達成できます。たとえば、ほぼすべてのオーディオ アンプのフラット ネスは、オーディオ帯域 (20 Hz ~ 20 kHz) 内で ±1 dB 未満です。±0.1 dB も珍 しくありません。

ラウドスピーカーの場合、さまざまな理由から、フラットな周波数応答を達成する ことは困難です。広い周波数範囲をカバーするには、クロスオーバー回路を備え たサイズ(および感度)の異なる複数のドライブユニットを組み合わせる必要があ ります。一部の周波数では、ドライバーがエンクロージャーと音響的に相互作用 し、ドライブユニットおよび/またはエンクロージャーの機械的共振により、応答曲 線に鋭い山または谷が生じることがあります。その結果、実用的な周波数範囲 で最大 20 dB のフラットネスからの偏差を持つ民生用ラウドスピーカーを見つけ ることは珍しくありません。それでも、ラウドスピーカーシステムでは比較的滑ら かでフラットなレスポンスを実現することが可能であり、フラットネスからの偏差が ±3 dB であれば「十分」と見なされます。ラウドスピーカーに対するリスナーの好 みに関する複数の研究によると、訓練を受けたリスナーは、軸上と軸外の両方で 滑らかでフラットな周波数応答と重低音を備えたシステムを好みます。

Application Note:

AD GRAS

音場

ラウドスピーカー測定を行うにあたって、音場の概念は非常に重要です。

## 自由音場

音響ラウドスピーカーの測定は、「自由音場」で実施する必要があります。自由 音場とは、音が障害物なしにあらゆる方向に自由に伝播できる、音源の周囲の 空間領域です。理想的な例は、点音源(そこから放射される音の波長に比べて 小さい物体)であり、地面より高く、反射面から離れています。理想化された点 音源が音を放射するとき自由音場では、音の強さ(単位面積あたりの音響パワ 一)は音源からの距離の2乗に反比例します(図1)。音の強さは音圧の二乗 に比例します。したがって、音圧レベルは音源からの距離が2倍になるごとに 6 dB 減少します。この現象は、逆二乗則または 6 dB/dd 則と呼ばれることもあ ります。



ラウドスピーカーとマイクが自由音場にある場合、マイクはラウドスピーカー から放射される直接音のみを測定します。これは望ましいことです。ラウドスピ ーカー自体から放射される音を測定して、ラウドスピーカーが配置されている 環境に関係なく、ラウドスピーカーを代表するデータを取得したいと考えます。

代わりに、ラウドスピーカーとマイクが通常の部屋にある場合、直接音の測定に 加えて、マイクは部屋内の床、壁、天井、および大きな物体からの反射音を測定 します(図 2)。直接音は最初にマイクに到達し、次に最も近い表面からの最初 の反射、次に 2 次および 3 次反射が続きます。直接音と比較して、反射する表 面の吸収特性と経路長の差に応じて、反射音波はレベルが低くなります。経路 長の違いは、直接音の到着と反射の間に遅延も引き起こします。これらの反射 音波は直接音を汚染し、DUT から放射される音とその周波数応答の誤った推定 を引き起こします。 図 1. 自由音場における音が放射

している理想的な点のソースの状態

## AD GRAS

通常の部屋は半残響音場と見なされます。これは、部屋の表面が入射する音波 の一部を吸収するためです。吸収の程度は、表面の仕上げ(たとえば、カーペ ット敷きの床とコンクリートの床)によって異なり、周波数によっても異なります。 残響室と呼ばれる特別な部屋には、完全な反響音場または拡散音場が存在す る可能性があります。残響室と呼ばれる特別な部屋には、最大限の反射が得ら れるように設計された硬い表面で構成された壁、床、天井があります。拡散音 場では、音波はすべての方向に同じ確率でランダムに移動します。



図 2. 通常の部屋でのラウドスピーカ 一測定環境

## 半自由音場

場合によっては、ラウドスピーカードライブユニットを単独でテストする場合、測定 基準によって半空間自由フィールドが指定されます。名前が示すように、半自由 空間では、音源が自由に放射できる3次元空間が、通常は硬い反射面によって 半分に分割されます。半空間自由音場の一例は、他の反射面から遠く離れた屋 外の固い地面にある音源です。別の例として、半無響室があります。コンクリー トのような硬く反射する素材でできている床を除いて、すべての部屋の表面は非 常に吸収性があります。自由場と半空間自由場は、それぞれ4π空間と2π空 間と呼ばれることがあります。これは、音源が遮るものなく放射できるステラジア ン単位の立体角に基づいています。

## 近接場/遠距離場

音響学におけるもう1つの重要な概念は、近距離場と遠距離場です。ソースから(そのサイズに対して)遠く離れている場合、逆二乗則(または 6 dB/dd ルール)が適用されます。この距離では、音場は安定し、予測可能な方法でソースから放射されます。ただし、音源の近くでは、音波ははるかに複雑な方法で動作し、 圧力と距離の間に一定の関係はありません。この近接場では、音のレベルは不確かです。したがって、測定は遠方界で行う必要があります。光源から遠方界までの距離は、光源のサイズによって異なります。経験則として、遠距離場は通常、 音源の最大寸法の 3 倍の距離から始まると考えられています。ただし、遠距離場は光源の最大寸法の 3 ~ 10 倍で始まることが示唆されています。

Application Note:

6

# 自由音場測定

To 自由音場環境を実現するには、アウトドア(屋外)と無響室の二つのオプション があります。

屋外

屋外で自由音場条件を実現するには、地面からの反射の影響を最小限に抑える ために、ラウドスピーカーとマイクを地面から高い位置に設置する必要がありま す。たとえば、ラウドスピーカーは、高い塔に取り付けたり、クレーンから吊り下 げたり、建物の屋根の隅から突き出たブームに取り付けることができます。必要 な高さはスピーカーのサイズによって決まり、それによってマイクが遠方にあるた めに必要な距離が決まります。たとえば、最大寸法が 0.33 m (13 インチ)の本 棚サイズのスピーカー キャビネットを考えてみましょう。音源の最大寸法の 3 倍 という遠方界距離の最小の経験則値を使用するには、マイクをスピーカーから 1 m (3.28 分)離す必要があります。6 dB/dd ルールに基づくと、反射音のレベル を直接音より 20 dB 下げるには、地上から 5 m (16.4 フィート)の高さが必要にな ります。このブックシェルフ スピーカーのサイズを 2 倍にすると、反射音から直 接音への同じ 20 dB の低減を得るのに必要な高さが 2 倍になります。

明らかに、地上 5 ~ 10 m (16 ~ 33 フィート) に設置されたスピーカーとマイクを 使用して測定を行うのは困難です。不便さに加えて、悪天候や風、交通などによ る周囲の騒音が問題となる場合があります。地面を反射面として使用することで、 屋外で半空間測定を行うことができます。この場合、スピーカーは地面と同じ高 さのバッフル内に取り付けられます。

**Application Note:** 

7

無響室

無響室は、壁、天井、床、ドアなどの内面に吸収性の高い素材で裏打ちされた 特別な部屋です(図3)。低い周波数での吸収を向上させるために、吸収材 (グラスファイバーまたはオープンセルフォーム)をくさび形に形成し、くさびの 先端を室内に向けます。完全無響(4π)チャンバーでは、通常、壁から吊り 下げられた開いた鋼線メッシュによって、吸収床ウェッジの上の音響的に透明な 作業面が提供されます。

電波暗室は、主にその吸収くさびの長さによって決まる下限周波数を超えると自 由音場に近似します。この周波数の下限は、別の経験則から推定できます。つま り、特定の周波数の音を吸収するには、吸収性材料の有効寸法が波長の少なく とも4分の1でなければなりません。1/4波長の法則と室温での空気中の音速 (344 m/s または 1,129 フィート/秒)に基づいて、長さ1m(3.28 フィート)のウェッ ジは、周波数が約86Hzを超える音を効果的に吸収できます。実際的な理由(そ してもちろんコスト)により、下限周波数が 60 ~ 80 Hz 未満の電波暗室を見つけ ることはほとんどありません。チャンバーは、既知の周波数応答を持つ十分な低 音を備えたスピーカー システム (サブウーファーなど)を使用して、より低い周波 数に合わせて校正できます。次に、この基準サブウーファーの周波数応答を見つ けることが課題となります。興味深いことに、電波暗室は、逆二乗則(または6 dB/dd 則)にどれだけ厳密に準拠しているかという点で認定されています。無響 室での音響パワー測定を対象とする ISO 規格では、無響室内の横断線に沿った 測定値が、周波数に応じて逆二乗則から 1.0 ~ 1.5 dB を超えて逸脱してはなら ないと規定しています。IEC 60268-5 では、チャンバーがスピーカーとマイクの間 の領域の逆二乗則の ±10% 以内になければならないと規定しています。

Application Note:

8



図 3. 無響室の一例

無響室では、スピーカーからの低レベル高調波歪みや、ディスプレイ画面や電子 部品などの低レベル騒音源から発せられる音の測定を可能にするために、周囲 騒音が低いことも望まれます。周囲の騒音を最小限に抑えるために、最適な無 響室は、外側の部屋の内側に内側の無響室として設計されています。さらに、外 側の部屋からチャンバーへの構造伝播騒音の伝達を最小限に抑えるために、内 側の部屋は柔軟な防振装置に取り付けられることがよくあります。図3に示すチ ャンバーは、最近、周囲騒音レベル-20.3 dB SPL で、地球上で最も静かな場所 として新しい世界記録を樹立しました。

## 準無響音測定技術

無響室の費用とアクセスの制限のため、通常の半残響室でのスピーカー(および マイク)の周波数応答の測定を可能にする準無響測定技術の開発に多くの研究 が費やされてきました。これらのテクニックはすべて時間を選択します。これらは、 広帯域信号でスピーカーを刺激し、測定された応答のうち、スピーカーからの直 接音を含むが部屋の表面からの反射を含む部分を除外した部分を分析すること によって機能します。

準無響技術は、信号処理の基礎の1つである線形システムの周波数応答とそ のインパルス応答の等価性を利用します。周波数領域では、システムの周波数 応答 H(f)単位入力あたりの出力の大きさと位相(または実数部と虚数部)を周 波数の関数として表します。時間領域では、そのインパルス応答 h(t)は、単位イ ンパルスまたはディラック デルタ関数によって刺激されたときのシステムの出力 を時間の関数として表します。動的システムのこれら2つの表現は同等であり、 フーリエ解析を使用して一方をもう一方から導き出すことができます。たとえば、 インパルス応答をフーリエ変換すると、周波数応答が得られます。同様に、周波 数応答の逆フーリエ変換によりインパルス応答が得られます。

Application Note:

時間選択テクニックは実際にどのように機能するのでしょうか? 図 4 に示す測定 セットアップを考えてみましょう。測定マイクは、半残響室のスピーカーの前の軸 上に配置されます。スピーカーの遠方界に存在させるには、距離 d は、スピーカ ーの最大有効寸法 M の 3 倍を超えるように選択されます。スピーカからマイク までの直接音の経路長は d で、最も近い反射面 (この場合は床) からの最初の 反射音の経路長は 2dR です。この幾何学形状に基づくと、マイクへの直接音の 到達と最初の反射との間の時間差 T は、T= 2dcR-d になります。ここで、c は音 速です。



図 4. 半残響空間における軸上の ラウドスピーカー測定

図 5 (上のグラフ) は、広い部屋の床上 2.86 m (9.4 フィート) に設置されたブック シェルフスピーカーの正面 1.17 m (3.84 フィート) で測定されたインパルス応答を 示しています。インパルス応答のピークは約 t = 3.5 ms で発生します。これは、 直接経路長 (1.17 m (3.84')) を音速 (334 m/s、1125.33 フィート/秒) で割った値に 相当します。インパルス応答では確認しにくいですが、時間 t = 16.5 ms と t = 16.5 ms で発生する小さな二次ピークがあります。後で。これらの小さなピークは、 床、壁、その他の部屋の表面からの反射によるもので、エネルギー時間曲線 (ETC) と呼ばれる図 5 の下のグラフで非常に見やすくなります。1960 年代に導 入された ETC [9] は、本質的にはインパルス応答の包絡線をプロットしたもので す。対数スケールで大きさをプロットすることで、室内反射の到達時間を非常に 簡単に確認できます。

**Application Note:** 

10



時間選択的測定または準無響測定では、インパルス応答にウィンドウを適用し、 最初の反射が到着した後(この場合は約15ms)のデータを除去し、フーリエ変 換を使用して周波数応答の大きさと位相を計算します(図6)。通常、滑らかな 遷移を作成するには、最初と最後にコサインテーパを持つ長方形のウィンドウが 使用されます。図6では、周波数応答の大きさにラウドスピーカーに印加される 電圧信号の大きさが乗算され、dBSPLでのRMSレベルが決定されます。



図 5. インパルス応答(上)とETC (下)

AD)

GRAS

図 6.
ウィンドウ処理後の図 5 の
インパルス応答から計算された RMS レベルおよび位
相応答

Application Note:

## インパルス応答の取得

時間選択的測定技術を使用するには、まずテストルームに設置されたスピーカー のインパルス応答を取得する必要があります。利用可能な方法はいくつかありま すが、それぞれに利点と欠点があります。

## インパルステスト

インパルス応答を取得する最も直接的な方法は、インパルス テストを通じて直接 測定することです。これには、狭い(たとえば幅 10 µs)電圧パルスをスピーカーに 印加し、その応答をマイクで測定することが含まれます。最初の室内反射がマイク に到達するまでにスピーカーからの直接応答が実質的に減衰するように、十分に 広い部屋が必要です。パルスのエネルギーは広い周波数範囲に広がるため、 パルスの大きさが数十ボルトであっても、特に低周波数で信号対雑音比(SNR)が 低くなります。その結果、SNR を改善するには多くの平均を使用する必要が あります。インパルス試験は 1970 年代に初めて開発されました。これは主に 他の測定技術に取って代わられています。

#### 最大長シーケンス測定

インパルス応答を測定する MLS 法は、1983 年に Borish と Angell によって発表 されました。最大長シーケンス (MLS) は、擬似ランダムバイナリシーケンスの 一種です。これは次数 N で指定できます。N はシーケンスの作成に使用される 2 進数 (またはシフト レジスタ)の数を表します。N 次の MLS は 2<sup>N</sup>-1 の長さを 持ち、その N 桁にバイナリ値 0 または 1 の可能なすべての組み合わせが 含まれます (すべての桁が 0 であるゼロ ベクトルを除く)。MLS には、インパルス 応答の測定に適した興味深い特性がいくつかあります。オーディオ テストでの 実用的な目的のために、MLS 信号は対称化されます (つまり、0 または 1 の 代わりに +1 または -1 の値を持つようにスケーリングされます)。

生の MLS 信号の興味深い特性の 1 つは、その波高率 (ピーク対 RMS レベルの 比) です。すべてのサンプルは、ランダムな分布で +1 または -1 のいずれかの値 を持ちます。したがって、ピーク値と rms 値は両方とも 1.0 となり、波高率は 1.0、 つまり 0 dB になります。ただし、この結果は生の MLS にのみ当てはまります。 MLS 信号が一般的なオーディオ測定チェーンに存在するフィルターを通過すると、 波形は大幅に変更され、その波高率は公称 11 dB に近づきます。

スピーカーのテストでは、MLS 技術は MLS で DUT を励起し、その出力を測定 することに基づいています。インパルス応答は、DUT への MLS 信号入力と 測定出力の循環相互相関によって得られます。他の準無響技術と同様に、 インパルス応答が導出されたら、それをウィンドウ処理して反射を含む部分を 除去し、フーリエ変換して DUT の伝達関数の推定値を得ることができます。 本質的に、MLS 信号はスペクトル的に平坦です(ホワイトノイズと同様)。 多くの場合、信号はピンクノイズ スペクトル(つまり、rms レベルが周波数と ともに直線的に減少する)になるようにフィルター処理され、音響システムに より適しています。

Application Note:

他の技術に対する MLS テストの利点の 1 つは、平均化を使用すると、MLS 入力 シーケンスと相関しない定常ノイズまたは衝撃ノイズに対する耐性が比較的高い ことです。ただし、欠点は、システムの線形応答を高調波歪みなどの非線形性か ら分離することができないことです。ラウドスピーカーは、電子システムに比べて 常に比較的高いレベルの歪みを持っています。MLS を介して測定されたインパ ルス応答では、この歪みやその他の非線形性が、インパルス応答に沿って分布 するアーティファクトまたはピークとして現れます。

### 対数掃引サイン波測定

周波数が連続的に変化する正弦波信号は、多くの場合、チャープと呼ばれます。 正弦波周波数が時間とともに直線的に変化する直線掃引正弦波チャープは、時 間遅延分光測定(TDS)などのオーディオ テストで何十年も使用されてきました。 TDS は、1967 年に初めて導入された、もう1 つのよく知られた準無響測定技術 です。これらの方法には、歪みなどの非線形効果をシステムの線形応答から分 離できないという制限もあります。

2000 年に Farina によって最初の対数チャープ技術が導入されたとき、チャープ 信号の値は劇的に変化しました。彼は、対数掃引正弦チャープ信号を使用してシ ステムを刺激すると、デコンボリューションを通じて、システムの線形インパルス応 答と各高調波歪み成分の個別のインパルス応答を同時に導出できることを発見 しました。たとえば、図 7 は、対数掃引サイン チャープで刺激されたアナログ グ ラフィック イコライザーからの信号のデコンボリューションの結果を示しています。 線形システムのインパルス応答は時間ゼロで示され、高調波歪み成分のインパ ルスは負の時間で対数的に間隔をあけて表示されます。さまざまなインパルスを 慎重に時間窓処理してフーリエ変換することによって、個々の応答関数を復元す ることができ、そこから多くの異なる測定値を数学的に導き出すことができます。 言い換えれば、ほぼすべての一般的なオーディオ測定を 1 回の高速取得で取得 できるため、テスト時間が大幅に短縮されます。

Application Note:



図 7.

アナログ グラフィック イコライ ザーのチャープ測定後のデコ ンボリューションによって導出 されたインパルス応答。高調 波歪みインパルスを示すため に振幅軸が拡大されています。

ファリーナ氏のオリジナルの論文は、部屋とスピーカーの反応の測定に焦点を 当てていました。Müller と Massarini は、高品質の室内インパルス応答を測定 するという要件に動機付けられ、室内測定や電気音響デバイスを含むほとんど の DUT では、MLS よりも対数掃引サイン チャープ法が好ましいことを示しまし た。Kite は、オーディオ デバイスのログ チャープ測定が従来のスイープ サイン 測定と同等の結果を提供することを実証し、クロストーク測定の拡張を提案しま した。この拡張には、DUT の各チャネルに適用される刺激信号をずらして、各 チャネルが前のチャネルから短時間オフセットされるようにすることが含まれま す。これにより、クロストークを周波数応答と歪みと同時に測定することが可能 になります。

対数掃引サイン チャープ測定は、2006 年に APx585 8 チャンネル オーディオ アナライザーの発売とともに初めて導入された、Audio Precision の APx500 オ ーディオ アナライザー プラットフォームの特徴となりました。導入以来、APx プ ラットフォームには、連続スイープと周波数応答という、電子オーディオ テストを 目的とした 2 つのチャープ測定がありました。連続スイープ測定では、レベル、 ゲイン、位相、高調波歪み、群遅延、クロストーク、インパルス応答などを含む多 数のオーディオ結果が得られます。周波数応答測定には、デバイスのレベルと ゲイン対周波数、および平坦性からの偏差を簡単に測定したいユーザー向けに、 これらの結果のサブセットが含まれています。2009 年に、特に音響デバイスの テストを目的としたログスイープ チャープ測定のバージョンが追加されました。 APx プラットフォーム。Acoustic Response と名付けられたこの測定には、ETC 結果、準無響分析のための音響反射をウィンドウアウトするためのコントロール、 およびスピーカーをテストするユーザーにとって興味深いいくつかの結果が含ま れています。 準無響測定の制限

上で述べたように、準無響技術は、室内反射を含むインパルス応答の部分をウ ィンドウアウトすることによって機能します。このウィンドウ処理により、インパル ス応答が十分に無視できるレベルに減衰する前に、インパルス応答が切り捨て られる場合があります。この切り捨てにより、特に低周波数で推定周波数応答 に誤差が生じます。たとえば、インパルス応答がピーク値の5ms後にウィンド ウ処理される状況を考えてみましょう。これは、天井高2.74m(9フィート)の部 屋で測定された小型(本棚サイズ)スピーカーの典型的な値になります。測定 距離 d = 1.0m、最も近い反射面までの距離 h = 1.36m(4.45')の場合、最初の 反射は直接音の約5.5ms後に到着します。したがって、インパルス応答は5.0 ミリ秒の長さにウィンドウ処理される可能性があります。



図 8 は、ピーク後 5 ms で測定された 1 つのスピーカーのインパルス応答をウ ィンドウ処理した場合の効果を示しています。このデータは、統合されたフルレ ンジ スピーカーを備えた、音響的に裏打ちされた小型の補聴器テスト ボックス での測定から得られたものです。このテスト設定では、このスピーカーの低周 波数での応答を正確に測定することはできませんが、図 8 はインパルス応答の ウィンドウ処理の劇的な影響を示しています。ウィンドウありの応答は、約 300 Hz 未満ではウィンドウなしの応答とは根本的に異なり、ウィンドウの平滑化効 果は約 1 kHz まで明らかです。ウィンドウ幅が T = 5 ms の場合、周波数領域 の分解能は約 1/T = 200 Hz です。グラフでは、200 Hz 未満の影付きの領域 は、この領域では曲線の信頼性が低いことを示すことを目的としています。た だし、ウィンドウ処理の効果は 200 Hz よりもはるかに高い周波数にまで及ぶこ とに注意してください。

#### Application Note:

15 Loudspeaker Electroacoustic Measurements

## 図 8.

ラウドスピーカーの周波数応 答は次のように計算されます。 ウィンドウのないインパルス応 答(青い実線のトレース)およ び5msウィンドウ(オレンジ色 の破線のトレース) スピーカーのインパルス応答の持続時間は、主にその低周波ロールオフ特性に よって決まります。これを音響測定で確認するには、周囲騒音が低い完全な無 響環境でインパルス応答を測定する必要がありますが、これを取得するのは困 難です。ただし、ラウドスピーカー システムの低周波動作は、その共振周波数や、 システム インピーダンスの単純な電気測定から得られるその他のパラメーターに 基づいて簡単にモデル化できます。たとえば、図9は、直径127mm(5フィート) の低周波ドライバーを備えた理想的な小型通気ボックスシステムのインパルス 応答を示しています。インパルス応答は、ピークの10ms後に終了する先細の 長方形のウィンドウで示されています。右半分には、図では、インパルス応答の 尾部の詳細を示すために、垂直スケールが40倍に拡大されています。示されて いるように、10msウィンドウではインパルス応答が大幅に切り詰められます。ウ ィンドウなしおよびウィンドウありのインパルス応答に対応する周波数応答の大き さを図10に示します。100Hz 未満の誤差と、ウィンドウ処理されたインパルス応 答の応答のリップルに注目してください。





図 9 は、インパルス応答のテールがピーク後 30 ~ 40 ms まで減衰していない ことを示しています。直接音の後に反射が 30 ミリ秒遅れるようにするには、非 現実的に広い部屋が必要になります。

Application Note:

16 Loudspeaker Electroacoustic Measurements

#### 図9.

小型通気ボックス型スピーカ ーのインパルス応答(青いトレ ース)ピークから10ミリ秒後 のテーパウィンドウ、通常の 表示スケール(左)と40倍に ズームした垂直スケール(右)

#### 図 10.

図 9 のウィンドウなし (青色の 実線トレース) およびウィンド ウあり (赤色の破線トレース) のインパルス応答から計算さ れた周波数応答 スピーカーのインパルス応答を短縮することで、準無響技術をより低い周波数まで拡張する方法は、Fincham によって提案されており、最近では Backman によって提案されています。これらは効果があるようです。しかし、Vanderkooy と Lipschitz は、その応用にはスピーカーの低周波応答のモデル化が必要である ため、これらのインパルス短縮技術は実際には測定方法として考慮すべきでは ないと示唆しています。

## 近接と遠距離場測定の組み合わせ

低周波数における準無響技術の不正確さを克服するアプローチの1つは、準 無響技術を近接場測定と組み合わせることです。Keele は、低周波数における スピーカーの遠距離場周波数応答が近接での測定によって推定できることを実 証しました。この関係は、ドライバーが硬いピストンのように動作する低周波数 でも当てはまります。実際には、測定マイクはドライバーのダスト キャップの非 常に近くに配置する必要があります。理論的には、真のニアフィールド圧力の1 dB 以内にするには、マイクはダスト キャップから 0.11r 以内になければなりませ ん。r はドライバーの半径です。たとえば、上記の直径 127 mm (5')ドライバー の場合、マイクはダスト キャップから 7 mm (0.28') 未満の距離にある必要があり ます。この近距離では、反射とノイズは基本的に除去されます。



図 11. 全範囲の周波数応答(回

折効果を除く)を取得する ために近接場測定と遠方 場測定を組み合わせる手 法を示すイメージ

Struck と Temme は、ニアフィールド技術で測定した低周波数応答と、準無響技術で測定した高周波数応答を組み合わせることにより、スピーカーのフルレンジ 周波数応答を導き出す方法を発表しました。これを図 11 に示します。遠方界 の準無響音測定は、3M を超える距離で実行されます。ここで、M はスピーカー エンクロージャの最も重要な寸法です。

#### Application Note:

Loudspeaker Electroacoustic Measurements

17

# AD GRAS

この測定により、周波数で役立つデータが得られます。ここで、T は室内反射を除去するためにインパルス応答に適用される時間窓の長さです。ニアフィールド測定は、マイクをドライバーに非常に近づけて行われます。この測定は、 $f = c/\pi$  M\*未満の周波数で有効です。ここで、c は音速、M はキャビネットの有効寸法です。ニアフィールド測定では、ファーフィールド応答よりもはるかに高いレベルの周波数応答曲線が得られます。曲線は、オーバーラップ領域のある点で遠距離場曲線と一致するように近距離場応答曲線をレベルで下にシフトし、曲線をつなぎ合わせることによって結合されます。オーバーラップ領域は、1/T と  $c/\pi$  M の間の周波数範囲です。

近接/遠距離場スプライス技術が機能するには、重複する周波数範囲が存在する ために、部屋がスピーカーのサイズに対して十分に大きい必要があります。さら に、スピーカー システムに 1 つ以上のポートまたは複数のドライバーがある場合、 手法はより複雑になります。各ドライバーとポートの近接場測定を行う必要があり、 異なる放射表面積を考慮してコンポーネントの応答を最初にスケーリングした後、 これらを複素領域(つまり、振幅と位相に関して)で合計する必要があります。

## 回折効果

遠距離場でスピーカーエンクロージャの低周波数応答を推定するために近接測 定を使用することの欠点は、バッフルステップ回折と呼ばれることもあるエンクロ ージャエッジからの回折の影響が含まれていないことです。この効果は、ドライバ ーが無限バッフルに取り付けられている場合には存在しない、低周波数での明ら かな「損失」と、高周波数での周波数応答のリップルを引き起こします。

簡単に言えば、バッフル回折効果は、周波数が増加するにつれて音の波長が短く なるにつれて、4 $\pi$  空間から 2 $\pi$  空間放射への移行として説明できます。バッフ ルの寸法に比べて波長が長い低周波数では、バッフルは音響的に透明であり、 音は 4 $\pi$  空間に放射されます。 波長がバッフルの寸法に比べて短い高周波では、 ドライバーは半空間 (または 2 $\pi$  空間)に放射します。その結果、全体の平均音 圧は高周波でのレベルの 2 倍 (または 6 dB 高く)なります。

平均レベルが全体的に 6 dB 増加することに加えて、高周波数と低周波数の間の 遷移領域では、バッフルの回折効果により、応答曲線にピークとディップが発生 します。このピークとディップは、バッフルの形状と寸法、およびバッフルの位置に 応じて変化します。バッフルにドライバー。1951 年に発表されたこの主題に関する 独創的な論文の中で、オルセンは 12 の異なるエンクロージャ形状について測定 された回折応答を実証しました。

Application Note:



## 図 12.

AD

197 x 294 mm の長方形バッ フルの中央に 127 mm ドライ バーが取り付けられた密閉ボ ックス型ブックシェルフ スピー カーの推定回折効果。

GRAS

エンクロージャの回折効果が考慮されていない場合、上記の近接/遠距離場接続 技術により、推定周波数応答に誤差が生じる可能性があります。幸いなことに、 バッフル回折をシミュレートするために利用できるソフトウェア ツールがあります。 たとえば、図 12 は、197 x 294 mm のフロントバッフルの中央に 127 mm ドライバ ーが取り付けられた長方形のスピーカー エンクロージャについて、Tolvan Data からの Edge と呼ばれるプログラムで推定されたバッフル回折を示しています。 図 13a は、同じスピーカー システムの 3 つの周波数応答曲線を示しています。 測定された近距離場応答、5 ms の時間窓を使用して測定された準無響遠距離 場応答です。12. 図 13b は、推定された回折応答を使用した場合と使用しない場 合の近距離場 / 遠距離場の応答曲線を接続した結果を示しています。推定され た回折(図 13b の赤いトレース)がないと、接続された曲線が低周波数で大幅に ずれていることに注意してください。



## 図 13.

(a) 近接場測定、回折補正された近接場測定、および遠距離場測定の相対応答(左)。
(b) 回折補正を行った場合と行わない場合の近距離/遠距離場応答の組み合わせ。

## グランドプレーンの測定

スピーカーの自由音場応答を近似するもう1つのアプローチは、グランドプレーン 測定技術です。この技術は、硬い反射面に直接置かれたスピーカーからの音響 反射が予測可能であるという事実を利用しています。

Application Note:



図 14.

硬い反射面の上 1 メートルで テストされたスピーカーとマイ クのイメージ

図 14 のスケッチを考えてみましょう。反射面から 1 m 上に配置されたスピーカ ーとマイクが示されています。マイクはスピーカーから 2 m 離れた軸上に配置さ れています。この形状では、反射音と直接音の経路長の差は約 894 mm になり ます。音速(室温で 343 m/s (1125.33 フィート/秒))では、これは 2.61 ミリ秒の 時間差を表します。したがって、サイン波信号がスピーカーによって生成される 場合、同じ周波数で本質的に同じ振幅の 2 つの正弦波信号がマイクに到達しま すが、反射音は 2.61 ミリ秒遅れます。この時間遅延は位相シフトを表します。 一部の周波数では、信号の位相が 180° ずれ、完全に打ち消されます。2 倍高 い周波数では、信号は正確に同相になり、それらを組み合わせた振幅は直接音 の 2 倍、つまりレベルで 6 dB 高くなります。これにより、図 15 に示すように、マ イクの位置にコムフィルター効果が発生します。示されているように、このジオメ トリでは、信号は 192 Hz の倍数で完全にキャンセルされ、384 Hz の倍数で合計 すると直接音の振幅の 2 倍になります。



ラウドスピーカーと測定マイクが反射面に近づくと、経路長の差が減少し、コ ムフィルターのノッチがより高い周波数で発生します。限定的なケースでは、 ラウドスピーカーとマイクは地面に直接配置され、基準軸がマイクに直接向く ようにスピーカーが傾けられます。

Application Note:

20 Loudspeaker Electroacoustic Measurements

#### ⊠ 15.

図 14 に示すジオメトリの反 射音と直接音の間の干渉に よって引き起こされるコムフ ィルター効果。 標準的な 1/2 インチ測定マイクの場合、マイクが表面に直接置かれている場合、 マイクの振動板の中心は接地面から約 6.4 mm 上になります。スピーカーの高 さが 40 cm の場合、コムフィルターの最初のノッチは約 68 kHz になり、その結 果、レベル応答は最大 20 kHz の直接音より 6 dB 高くなります。音源の高さが 増加すると、最初のノッチの周波数が低下し、グランドプレーン測定の上限周波 数範囲が 20 kHz 未満の周波数に制限されます。この影響を軽減する 1 つの 方法は、高周波ドライバーを地面の近くに配置することです (つまり、バッフルの 上部にツイーターを備えたラウドスピーカー システムを反転することです)。



図 16 に示すように、マイクロホンの観点からは、グランド プレーンに対して対称 に配置された 2 つ目の同一のスピーカーがあるように見えます。コムフィルター の最初のノッチより下の周波数では、信号は同相になり、結合レベルは 6 dB 高 くなります。直接音のレベルです。これは、意図した測定距離の 2 倍の距離に マイクを配置することで有利に利用できます。たとえば、一般的な仕様は、1 W の正弦波刺激により 1 m の距離で軸上で測定された周波数応答です。ラウドス ピーカーが十分小さく、DUT の自由音場に 1 m あると仮定すると、2 m でのグラ ンドプレーンの測定は、1 m での自由音場測定と同じレベル応答が得られます。

図 17 は、広いオープンフィールドでの小型ブックシェルフスピーカーのグランド プレーンの測定結果と、1 W の入力により2 m で測定された結果の周波数応答 を示しています。この場合、反射面を確保するために、ラウドスピーカーとマイク は地面に置いたテーブルの上に配置されました。 図 16

グランドプレーンの測定。ス ピーカーは2m離れたマイク に向かって傾けられます。反 射音は、反射面の下に対称 的に配置されたスピーカーの 鏡像と考えることができます。

Application Note:



## 図 17.

グランドプレーン技術を使用 して測定されたブックシェルフ スピーカーと、2 m での結果 の周波数応答

AP) GRAS

グランドプレーン測定は、電波暗室に代わる安価な代替手段を提供しますが、 まだいくつかの問題があります。問題の1つは回折です。スピーカーの反射像 により、バッフルは実際の高さの2倍に見え、接触するエッジに沿って異なる回 折応答が発生します。地面と一緒に。また、スピーカーから約10m以内に垂 直反射面のない広いオープンエリアが必要です。そしてもちろん、車両、機械、 航空機、風による屋外の周囲ノイズは、特にDUTの出力が比較的低い低周波 測定の場合、通常懸念されます。

Application Note:

# 標準ラウドスピーカー測定

## 測定環境

IEC 60268-5 では、ラウドスピーカー測定の設定条件に関して示しています。

定格条件

測定を行うための正しい条件を決定するために、IEC 60268-5 では、メーカーの 仕様から取得する必要がある定格条件として知られるいくつかの特性を指定 しています。これらの特性を測定する必要はありませんが、他の測定特性は その値に基づきます。定格条件を表1に示します。

条件	<u>詳細事項</u>
定格 インピーダ <b>ンス</b>	ラウドスピーカーを駆動するアンプの出力を定義するために 使用される
定格サイン波電圧 または電力	熱的または機械的損傷を受けることなくラウドスピーカーが継続的に 処理
定格ノイズ電圧 または電圧	ラウドスピーカーが熱的または機械的損傷を受けることなく継続的 に処理できるプログラムシミュレーションノイズ信号の電圧
定格周波数範囲	ラウドスピーカーが使用されることを意図した周波数の範囲
基準面	基準点と基準軸を定義するために使用される平面。通常は前面放射 面に平行です。
基準点	基準軸を定義するために使用される基準面上の点 (通常、対称構造 の対称点)
基準軸	周波数応答および指向性測定のゼロ軸として使用される、基準点 で基準面を通過する線

表 1. メーカー指定の 定格条件

通常の測定環境

IEC 60268-5 には要望されるいくつかの測定条件が記載されています。 以下の通りです。:

- 取り付け
- 音響環境
- ・ ラウドスピーカーとマイクロホンの位置
- テスト信号

Application Note:

Loudspeaker Electroacoustic Measurements

**2**<sub>3</sub>

# AD GRAS

取り付け

ラウドスピーカードライブユニット(またはドライバー)の性能は、ユニット自体の特性とその音響負荷に依存し、さらにその音響負荷はその取り付け配置に依存します。ドライブユニットは3つの構成のいずれかで取り付けることができ、選択された構成はテスト結果に明確に記載されています。:

- 1. 標準バッフル、または2つの指定された標準測定エンクロージャの1つ
- 2. バッフルやエンクロージャーの無い自由空間
- 3. 半空間の自由フィールドでは、反射面と同一面になります。

通常、ラウドスピーカー システムは追加のバッフルなしで測定されます。メーカー はバッフルの使用を指定できますが、その場合、取り付け配置の説明をテスト結果 に含める必要があります。

音響環境

IEC 60268-5 では、指定された 5 つの音場のうちの 1 つで測定を行うことが求められています。:

- 1. <u>自由音場条件</u>: 無響室では、音源からの音の伝播が基準点と測定マイクの 間の軸上で ±10% 以内の 6 dB/dd ルールに従う場合、自由音場の最小要件 が存在すると考えられます。
- 2. <u>半空間自由音場条件</u>: 半空間の自由音場では、反射面は、表面と測定マイクの間で 6 dB/dd ルールが ±10% 以内に適合するのに十分な大きさである必要があります。
- 3. <u>拡散条件</u>: 拡散音場(残響室など)を使用する場合は、1/3 オクターブ帯域に 制限されたノイズで測定を実施する必要があります。
- 4. シミュレーション上の自由音場条件: これは、準無響技術の使用を指し、 直接音が減衰した後に反射が届くように、遮るもののない大きな部屋を使用 することを指定します。この規格ではインパルス試験技術のみに言及してい ますが、おそらく他の準無響技術も使用できると思われます。
- 5. シミュレーション上の半空間自由音場条件: この条件は、準無響技術が 半空間自由場をシミュレートすることを除いて、上記の4と同じです。 テストのために選択された音場のタイプは、テスト結果とともに明確に 示される必要があります。

Application Note:

## ラウドスピーカーとマイクロホンの位置

IEC 60268 では、理想的には、自由音場および半空間自由音場条件での測定は、 ラウドスピーカーの遠方界にある測定マイクを使用して実行する必要があると規 定しています。ただし、実際には、無響室の不完全性や背景雑音の影響により、 スピーカーからマイクまでの距離に上限が課される可能性があると同報告書は指 摘しています。したがって、測定距離は 0.5 m または整数メートルのいずれかで あり、結果は 1m として参照されます。 GRAS

AD)

単ードライブ ユニットの場合、条件により別の値が要求されない限り、IEC 60268-5 では測定距離を1mと指定しています。

IEC 60268-5 では、シミュレートされた自由音場条件について、自由音場条件と同 じ測定距離要件を指定していますが、直接の音と最初の反射音の間の時間を最 大化するために、スピーカーとマイクを測定室内に配置する必要があるという追 加の注意事項が付けられています。最初の反省。また、打ち切りによる測定され た周波数応答の誤差は、対象の周波数範囲にわたって 1 dB を超えてはいけな いとも述べています。

## テスト信号

IEC 60268-5 は次の利用するテスト信号タイプに関して規定しております。:

- どの周波数でも定格正弦波電圧を超えない正弦波信号。ラウドスピーカーの入力端子間の電圧は、すべての周波数で一定に保つ必要があります。
- ・ クレストファクターが 3~4の広帯域ノイズ信号
- 1/3 オクターブ バンドでフィルタリングされたピンク ノイズで構成される 狭帯域ノイズ信号
- ・ インパルス信号(インパルス試験用)

## 測定装置

IEC 60268-1 では、既知のキャリブレーションを備えたマイクを使用する必要があ ると規定しています。自由音場測定条件で推奨される方法は、GRAS 46AE 1/2<sup>"</sup>CCP 自由音場標準マイク セットなどの自由音場測定マイクを使用することで す(図 18)。これらの校正済みマイクは安定しており、広い周波数範囲にわたって 平坦な周波数応答を備えています。精度を高めるために、オーディオアナライザ の入力イコライゼーション (EQ) 機能を使用して、測定された応答から平坦性から の偏差を排除できます。拡散フィールド条件の場合は、ランダム入射測定マイク を使用する必要があります。

**Application Note:** 

Loudspeaker Electroacoustic Measurements

25





この規格では、信号発生器、スピーカーの駆動に使用されるパワーアンプ、およ びマイク測定システムの周波数応答が ±0.5 dB 以内の平坦であることも規定し ています。AP オーディオアナライザは、APx1701 トランスデューサテストインタ ーフェイスと同様に、この要件を簡単に満たします(図 19)。このラウドスピーカ ー テスト アクセサリには、2 つの独立したチャネルとして構成された計装品質の パワー アンプが装備されており、単ーチャネルあたり 8Ω で最大 100 W の電 力定格、DC から 100 kHz までのフラットな周波数応答、低出カインピーダンス、 内蔵電流検出抵抗、および 事前偏極およびファントム電源供給の測定用マイク をサポート。



## プラス端子

IEC 60268-1 のセクション 14 では、ドライバーの端子にプラスとマイナスのマー クを付けることが指定されています。正しいマーキングのテストは、プラス端子 にプラスの DC 電圧を印加しながら、ドライブ ユニットの前で音圧レベルを測定 することによって行われます。図 20 に示すように、DC 電圧が印加されると、 測定された音圧レベルが増加するはずです。



図 18. GRAS 46AE ½" 音場用標準マイクロホン セット

図 19. APx1701トランスデューサ ーインターフェース

### 図 20.

+1 Vdc の電圧ステップ を適用したドライバーの ニアフィールドで測定さ れた音圧波形

Application Note:

## インピーダンスと微分特性

定格インピーダンス

スピーカーの定格インピーダンスは、スピーカーを駆動するために必要な電力を 定義するために使用される純粋な抵抗の公称値です。公称抵抗値が使用され ますが、スピーカーのインピーダンスはフェーザまたは複素量(振幅と位相の両 方を持つ)であり、可聴周波数範囲にわたって大幅に変化します。たとえば、図 21 は、20 Hz から 20 kHz までの 3 ウェイ ラウドスピーカー システムのインピー ダンスの大きさを示しています。曲線内の 3 つのピークは、システム内の 3 つ のドライバーに関連する共振周波数です。



21.
インピーダンス = 8 オーム
の 3 ウェイスピーカーシス
テムのインピーダンス

IEC 60268-5 は、定格周波数範囲内のインピーダンスの大きさの最小値が定格 インピーダンスの 80% を下回ってはいけないと規定しています。この規格では、 定格周波数範囲外の周波数 (DC を含む) でのインピーダンスが公称インピーダ ンスの 80% 未満である場合、そのことを仕様に記載することも求められています。 図 21 のインピーダンス曲線の最小値は、この公称 8 オーム システムでは 6 オ ームをわずかに下回っており、このシステムが IEC 60268-5 の定格インピーダン ス要件を満たしていないことを示していることに注意してください。

### インピーダンス曲線

IEC 60268-5 では、標準オーディオ周波数範囲(20 Hz ~ 20 kHz)にわたってイ ンピーダンス振幅曲線を測定することが求められています。ドライブ ユニットの 場合、IEC 60268-5 は、ドライバーを標準バッフルまたは自由空気に取り付ける 必要があることを示しています。ドライブユニットのインピーダンスを比較する場 合、取り付け方法が測定されたインピーダンスに大きな影響を与える可能性が あるため、同じ取り付け方法が使用されるように注意する必要があります。

Application Note:

インピーダンスは、周波数に対して一定の電圧をスピーカーに印加し、入力端 子の電圧と電流を測定することによって測定されます。対数掃引チャープ信号 は、インピーダンス測定に適した刺激となります。通常、電流は、図 22a に示す ように、スピーカーと直列の小さな検出抵抗器の両端の電圧降下を検出するこ とによって測定されます。APx1701トランスデューサテストインターフェイス (図 18)を使用すると、インピーダンス測定が簡単になります。APx1701トランス デューサテストインターフェイスには、各パワーアンプ回路のグランドレッグに 電流検出抵抗が内蔵されています。APx1701を使用していない人向けに、図 22b にインピーダンス測定を行うための便利なアクセサリを示します。2 つの選 択可能なセンス抵抗とコネクタを備えており、ラウドスピーカーとパワーアンプを オーディオアナライザに簡単に接続できます。



インピーダンス測定に使用される駆動レベルは、結果の精度に大きな影響を与 える可能性があります。これは、スピーカーが線形範囲内で適切に動作するこ とを保証するのに十分なほど低くなければなりませんが、良好な S/N 比を保証 するのに十分なほど高い必要があります。適切なレベルを選択するには、いく つかの異なるドライブレベルでの測定値の一貫性を検査する必要があります。

### ティール・スモールパラメーター

IEC 60268-5 では、インピーダンス曲線から導出される 3 つのスピーカー ドライ ブ ユニット特性を取り上げ、次のように定義しています。

- 1. 共振周波数 (FS): インピーダンスの大きさの最初のピークが発生する周波 数。
- 2. 総Q ファクター (QTS): 共振周波数における音響または機械インピーダンスの慣性部分とインピーダンスの抵抗部分の比。
- 3. コンプライアンスの等価量 (∀ュ。).

Application Note:

28 Loudspeaker Electroacoustic Measurements

#### 図 22.

- (a) インピーダンス測定の 回路図
- (b) IMP1 インピーダンステ ストフィクスチャー

FS、QTS、VAs は、スピーカードライバーの低周波動作を特徴付けるために使用 される電気機械パラメータの大きなセットのうちの3つにすぎません。これらの パラメータは、A.N. にちなんで、総称して Thiele-Small (T/S) パラメータと呼ばれ ます。Thiele と R.H. Small は、単純な電気インピーダンス測定から得られるこれ らのパラメータをスピーカーエンクロージャ システムの設計にどのように使用で きるかを示す影響力のある論文を発表しました。

IEC 60268-5 は、測定されたインピーダンスの大きさの共振領域から QTS と V<sub>AS</sub> を計算するためのいくつかの簡単な手順を指定しています。Audio Precision の APx500 オーディオ アナライザのような最新のシステムでは、T/S パラメータは、 測定された複素インピーダンス曲線にドライバーの電気機械モデルを当てはめ ることによって導出されます。インピーダンスは、規格で指定されているように、 20 Hz ~ 20 kHz の範囲で測定でき、カーブフィットは次の点に集中します。共鳴 付近の領域 (図 23)。これは良好なフィッティングにとって最も重要です。



Audio Precision の APx500 オーディオ アナライザーには、T/S パラメーターを 導出する 3 つのドライバー モデルから選択できます。標準モデル、LR-2 モデ ル、およびライト モデル (表 2)。3 つのモデルすべてにおいて、ドライバーの移 動質量は、表 2 の各回路図の右側にある点線のボックスとして示されている共 振システムとしてモデル化されています。標準モデル (a) は、単純な直列抵抗 とボイス コイルのインダクタンスがドライバーの電気インピーダンスを正確にモ デル化すると仮定しています。実際のシステムでは、磁石とポールピースの渦 電流損失により、インピーダンスの実部が周波数とともに上昇しますが、これは 標準モデルでは予測できません。

#### ⊠ 23.

8 オーム、直径 130 mm ドラ イバーのインピーダンスの大 きさ(左)と位相(右)を測定し ました。データに適合したモ デル曲線は、赤い実線のトレ ースとして表示されます。

Application Note:

# AD GRAS



## 表 2.

T/S パラメータを導出するために使用される3つの電気機械回路モデル。

Application Note:

LR-2 モデルは、表 2b に示す機械インピーダンスと直列のネットワークが、渦電 流損失を含むコイルの電気インピーダンスを正確にモデル化すると仮定していま す。このモデルは、標準モデルよりも測定されたインピーダンス曲線により正確 に適合し、物理コンポーネントまたはデジタル フィルターを使用して実装できます。

ライト モデルは、表 2c に示す機械的インピーダンスと直列のネットワークが、 渦電流損失を含むコイルの電気的インピーダンスを正確にモデル化すると仮定 しています。このモデルは、測定されたインピーダンス曲線に非常に正確に適合 しますが、分数抵抗やインダクタンスなどの実現不可能なパラメーターを使用する ため、物理コンポーネントやデジタル フィルターを使用して実装することは できません。特定のソフトウェア ツールを使用すると、Wright モデルはクロス オーバーやエンクロージャの設計に役立ちます。

自由空間中での1回のインピーダンス測定からT/Sパラメーターの完全なセットを導き出すには、空気負荷のないドライバーの移動質量(M<sub>MD</sub>)が必要です。 M<sub>MD</sub>が不明な場合は、ドライバーを分解(通常は破壊を意味します)し、可動コン ポーネントの重量を測定することで推定できます。M<sub>MD</sub>が不明であり、ドライバー が M<sub>MD</sub>を測定する余裕がない場合は、T/Sパラメーターの完全なセットを使用 することもできます。2番目の測定を必要とする2つの手法のいずれかを使用 して推定されます。追加された質量または既知のボリューム技術。

追加質量技術の場合、自由空気中でのインピーダンス測定に続き、既知の質量 をドライバーに追加した後に2回目のインピーダンス測定が行われます。通常、 「粘着性」モデリング粘土のトロイドは精密スケールで計量され、ダストキャップ を囲むドライバーコーンに一時的に追加されます。この追加された質量により、 ドライバーのインピーダンス曲線の共振ピークが周波数と振幅の両方で低くシフ トします(図 24)。次に、測定アルゴリズムは、インピーダンス曲線のこの変化か ら追加のパラメーターを導き出します。

Application Note:

31



## 🗵 24.

自由空間中およびドライバー に質量を追加した後のインピ ーダンス測定

AD)

GRAS

既知容積(または密閉ボックス)手法は、2番目のインピーダンス測定が既知 容積の密閉筐体内でドライバーを発射して行われることを除いて、追加質量 手法と似ています。密閉ボックスとドライバーコーン内に含まれる空気の量 は、インピーダンス曲線の共振ピークを周波数と大きさの両方でより高くシフ トさせるスプリングのように作用します。次に、測定アルゴリズムは、インピー ダンス曲線のこの変化から追加のパラメーターを導き出します。

## 入力電圧と電力

IEC 60268-5 のセクション 17 では、熱的または機械的損傷を受けることなく スピーカーが耐えられる電圧レベルを決定するために測定する必要があるい くつかのスピーカー入力電圧特性を指定しています。これらを表 3 に示しま す。

Input Voltage Characteristic	Test Duration
Rated noise voltage	100 hours
Short-term maximum input voltage	1 second
Long-term maximum input voltage	1 minute
Rated sinusoidal voltage	1 hour

表 3 の最初の 3 つの入力電圧特性は、IEC 60268-1 で指定された特別なバンド パス フィルターでピンク ノイズをフィルター処理することによって得られたプログラ ム シミュレーション ノイズ (PSN) 信号を使用しています。定格雑音電圧テストで は、波高率が 1.8 ~ 2.2 になるように信号がさらに調整されます。この PSN 信号 の両方のバージョンは、Audio Precision の APx500 オーディオ アナライザーに組 み込まれています。 図 3. IEC60268-5 で規定される入力 電圧特性

さ

IEC 60268-5 のセクション 18 では、対応する入力電力特性が指定されています。 これらは、方程式 P<sub>i</sub> = U<sub>i</sub><sup>2</sup>/R を使用して、測定された電圧特性から単純に計算 れます。ここで、U<sub>i</sub> は測定された入力電圧特性、R はスピーカーの公称入力 インピーダンスです。

## 周波数応答

IEC 60268-5 のセクション 21 では、周波数応答は、自由磁場または半空間自由 磁場条件下で、基準軸および基準点に対して指定された位置で、指定された定 電圧で測定されたものとして指定されることを示しています。

#### 有効な周波数範囲

セクション 21 では、有効周波数範囲 (EFR) と呼ばれる特性も定義します。EFR は、 スピーカーの基準軸で行われる周波数応答測定から決定されます。最初に 1 オクターブの帯域幅にわたって平均され、最大感度の周波数を中心とした最大 音圧レベルを見つけることによって導出されます。次に、応答が最大音圧レベルを 10 dB 以下下回らない下限周波数と上限周波数が求められます。1/9 オクターブ より狭い応答曲線の鋭い谷は、EFR を決定する際には無視されます。

## 指向性特性

#### 指向性応答パターン

IEC 60268-5 では、指定された面で測定した音圧レベルを、測定軸と基準軸の間の 角度と放射音の周波数の両方の関数として指定することが求められています。 指向性応答の測定は、スピーカーの基準点から指定された距離にある自由音場 条件下で行われます。自由音場条件が確立されると、指向性の測定は非常に 簡単になります。通常、スピーカーは図 25b に示すような測定用ターンテーブルに 取り付けられます。周波数応答は、軸上および軸から外れたいくつかの角度位置で 測定されます(図 25a)。軸上測定が設定されると、システムは角度位置の数を ループし、ターンテーブルを回転させ、各ステップで周波数応答測定を繰り返します。 波長が短い高周波での指向性パターンのローブを解決するには、角度位置の わずかな増分が必要になる場合があります。図 25b のような最新のターン テーブルの角度ステップ サイズは 0.5°、精度は 0.05°です。

**Application Note:** 

# AD GRAS



Audio Precision は、テスト位置の定義、データ収集全体にわたるアナライザ ーとターンテーブルの制御、測定結果の分析など、極測定を行うプロセス全 体を自動化する APx500 オーディオ アナライザー用のアプリケーションを提 供します。スピーカー システムの測定された極性応答パターンの例を図 26 に示します。125 Hz での無指向性応答パターンの不規則性に注目してくださ い。これは、おそらく、これらの測定に使用された電波暗室の自由音場条件 の不正確さが原因と考えられます。



指向性データの別の表現を図 27 に示します。この 3 次元プロットでは、音圧 レベルが測定角度対周波数のプロット上の色の強度で表されます。

## Application Note:

34

Loudspeaker Electroacoustic Measurements

#### 図 25. (a) 地向州測空の

(a) 指向性測定の概要図 (b) Outline 社ターンテーブル 製品

### 図 26.

APx Polar Plot Utility を使 用して 1°の角度分解能で 測定した、複数の周波数に おける 1 つの平面における スピーカーの応答。



図 27.

AD

GRAS

指向性データを表示する代替 手段。このプロットは、VACS ソフトウェアにインポートされ た図 26 のプロットのソース データを示しています。

## 振幅非直線性

IEC 60268-5 のセクション 24 では、高調波歪み、変調歪み、差周波歪みなどの 歪み測定について説明しています。

### 高調波歪み

定格正弦波電圧までの入力レベルでの高調波歪み測定の場合、IEC 60268-5 で は、周波数を 5 kHz まで増加させながら一連の正弦波電圧でスピーカーを駆動 することが規定されています。測定は、ラウドスピーカー システムの場合は自由 音場空間、またはドライブ ユニットの場合は半自由音場空間で、軸上の測定マイ クを使用して実行されます。全体の騒音レベルだけでなく、個々の高調波の騒音 レベルも測定されます。全高調波歪み(THD)は、全体のサウンドレベルに対す る比率として表されるすべての高調波の合計として計算されます。この規格では、 2 次および 3 次の高調波歪みも指定されており、2 次および 3 次の高調波のレ ベルは、全体のサウンドレベルに対する比率として表されます。

「インパルス応答の取得(12ページ)」で説明したように、対数掃引サイン チャー プ刺激を使用して実行される周波数応答測定には、1回の測定で主応答と同時 に高調波成分が得られるという利点があります。たとえば、図 28 は、基本波、2 次、3次、および THD レベルを 1 つのグラフに示しています。このスピーカーで は、約3kHz までは3次歪みが THD を支配し、より高い周波数では2次歪みが 支配的であることに注意してください。Audio Precisionの APx プラットフォームの チャープ測定には、20次までの個々の高調波と、H2から H20までの高調波の 任意の組み合わせの合計を追跡する機能が含まれています(図 29)。

Application Note:

Loudspeaker Electroacoustic Measurements

35



## 図 28.

AD)

スピーカーのニアフィールド で測定されたレベルと歪み のグラフ。基本波 (F)、2 次 および 3 次の歪み成分 (H2 および H3) のレベル、および 合計の歪みレベルを示しま す。

GRAS



# 図 29.

図 28 の測定の 20 次 (H20) と THD 比のプロット。

定格正弦波電圧よりも高い信号レベルでテストするために、IEC 60268-5 では、ス ピーカーをトーンバーストで刺激する方法を指定しています。バーストは通常、あ る周波数で正弦信号を生成し、高レベルと低レベルの間でレベルを急激に切り替 えることによって行われます。たとえば、図 30 の左側は、1 kHz の正弦周波数で バースト波形、高レベルで 40 ms、続いて 20 dB 低いレベルで 160 ms で刺激さ れたスピーカーから取得した信号を示しています。たとえば 25% のデューティ サ イクルでこのタイプのバースト信号を使用すると、スピーカーをその定格電圧より も高いレベルで刺激できます。図 30 の右側に示すように、信号の高レベル部分 で取得された波形のサブセットを抽出して FFT 分析を行うことができます。高調 波歪み成分は FFT スペクトルから抽出され、THD の計算に使用されます。この 例の場合、測定された THD は -54 dB でした。

Application Note:



### 図 30.

AD

GRAS

左: 110 dBSPL で取得した 1 kHz サイン バーストの波形。 右: 高レベルバースト正弦波 の取得された波形サイクル の 40 ms サブセットの FFT。 結果の THD = -54.0 dB

#### Rub & Buzz 歪み

「Rub & Buzz」という用語は、通常、ドライバーのボイスコイルの擦れ、緩んだ部品 のうなり音、ギャップ内の遊離粒子、リード線がコーンを叩く、ボイスコイルがコー ンに突き当たるなどの機械的欠陥によって引き起こされるスピーカーの歪みの一 種を指します。バックプレートなどこれらの欠陥は、知覚される音質を大幅に低 下させる可聴歪みを引き起こす可能性があります。IEC 60268-5 の付録 D には、 欠陥を聞きながら、定格正弦波電圧でスピーカーに印加される正弦波信号の周 波数を手動でスイープすることを含む、Rub & Buzz をチェックするためのリスニン グテストが記載されています。訓練を受けたリスナーは、このような可聴欠陥を 検出するのが得意ですが、これらのテストが必要な実稼働テスト環境のような繰 り返しの多い状況では、オペレーターのパフォーマンスが急速に低下する可能性 があります。さらに、いくつかの Rub & Buzz の欠陥によって引き起こされる歪み は、製造テスト環境での可聴閾値を下回る可能性があります。したがって、Rub & Buzz 歪みを検出する客観的で再現可能な手段が必要です。

APx500 オーディオ アナライザ プラットフォームの音響応答測定には、この種の 歪みを検出するためのオプションの Rub& Buzz 結果があります。この測定では、 対数掃引正弦波チャープ刺激を使用します。これは、掃引範囲内のすべての周 波数を刺激し、どの周波数で Rub & Buzz 歪みが発生するかわからないため、ラ ビングおよびバズテストにはステップ正弦波手法よりも優れた選択肢です。Rub & Buzz の欠陥は、ドライバーの共振周波数に近い信号によって引き起こされる ことがよくありますが、刺激周波数よりも何倍も高い周波数で聞こえる、短期間の 過渡的または衝撃的なスパイクを引き起こす傾向があります。これらの短い過 渡信号は、従来のフーリエ解析を使用して検出するのが困難です。Rub & Buzz アルゴリズムは、チャープ刺激周波数を追跡するスライディング・ハイパス・フィル タを使用して DUT の出力をフィルタリングすることによって機能しますが、コーナ ー周波数は通常基本周波数の 20~30 倍です(図 31)。

Application Note:

このフィルタからの残差がサイクルごとに時間領域で分析され、Rub & Buzz のクレストファクター (残差信号のピーク対 RMS 値の比) および Rub & Buzz のピーク比 (RMS 値の比) が決定されます。(残留信号のピーク値から主信号の実効値まで)。



図 31. APx オーディオアナライザー の Rub & Buzz 検出概要図

図 32 は、ハイパスフィルタを基本周波数の 20 倍に設定して 50 Hz ~ 20 kHz でテストした、通常のドライバと重大な欠陥のある 114 mm ドライバのサンプルの Rub & Buzz の測定結果を示しています。 データは測定帯域幅(24 kHz)の 1/20 である約 1.2 kHz まで及ぶことに注意してください。示されているように、Rub & Buzz のクレストファクターとピーク比の結果は両方とも、正常なドライバーと比較して欠陥のあるドライバーのいくつかの周波数帯域で大幅に高く、欠陥が存在することを示しています。

Application Note:



Rub & Buzz を検出する別のアプローチは、高周波高調波のレベルの変化を測定 することに基づいています。たとえば、図 33 は、上記の正常なドライバと欠陥の あるドライバの歪み積比(H10:H15)と呼ばれる測定結果を示しています。この結 果は、ログチャープ測定からの高調波 10 ~ 15 を電力合計し、その合計を全体 の信号レベルに対する比率として表すことによって計算されます。図に示すよう に、欠陥のあるドライバーは、ほとんどの周波数範囲にわたって正常なドライバ ーよりも明らかに高い歪みレベルを持っています。



図 33.
図 28 と同じドライバー測定の歪み積比(高調波 10~15)

## 図 32.

114 mm (4.5 インチ) ドライ バーの正常サンプルと不 良サンプルの Rub & Buzz ピーク比(上) とクレストフ ァクター(下)。

Application Note:

39 Loudspeaker Electroacoustic Measurements

# AD G.R.A.S

最後に

主要なラウドネススピーカーの電気音響測定の高レベルの概要はこれで終わりです。スピーカーのテストは魅力 的な主題であり、さらに詳しい情報を求める読者は、この主題に関して公開されている豊富な情報を活用すること をお勧めします。

詳細は以下のリンクを参照願います。

https://www.ap.com/download/appnote-loudspeaker-electroacousticmeasurements/?wpdmdl=8125&ind=TG91ZHNwZWFrZXIgRWxIY3Ryb2Fjb3VzdGljIE1IYXN1cmVtZW50cyAtIE FwcGxpY2F0aW9uIE5vdGUucGRm



© 2021 Audio Precision, Inc and GRAS Sound & Vibration / All Rights Reserved. XXI02150730

www.ap.com / www.grasacoustics.com

40,

Application Note: