



ヘッドホンの 電気音響測定

Audio Precision and GRAS Sound & Vibration

APPLICATION NOTE

はじめに

このアプリケーション ノートでは、音楽やその他のフルバンドオーディオプログラム素材を聴くことを目的としたヘッドホンとイヤホンのオーディオ品質を特徴付けるために、主要な電気音響測定の詳細を説明します。これらの測定はヘッドセットにも適用されますが、ヘッドホンとして使用される場合に限りです。

イヤホンは耳に密接に結合し、関連する音響伝達経路があるため、ヘッドホンの測定は複雑です。ここでは、これらの課題、ヘッドホンの種類、測定基準、ヘッドホンの音響、ヘッドホンの測定に必要な音響試験治具、およびヘッドホン測定の実践的な側面について説明します。また、客観的な測定にも焦点を当てます。

このアプリケーション ノートでは、次の電気音響ヘッドホン測定について説明します。

- » Frequency Response (周波数応答)
- » Electrical Impedance (電気的インピーダンス)
- » Input voltages (入力電圧)
- » Sound Pressure Level (音圧)
- » Distortion (歪み)
- » Noise Attenuation (ノイズ減衰)
- » Crosstalk Attenuation (クロストーク減衰)

業界標準とは？

性能測定を行う際は、通常、業界標準に準拠することが望ましいです。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的な振る舞いに関する業界の専門家のコンセンサスを表しています。ヘッドフォンの測定をカバーする主要な国際規格、およびこのアプリケーションノートは以下の規格にフォーカスしています。 IEC 60268-7: サウンド システム機器、パート 7: ヘッドホンおよびイヤホン

イヤホンのタイプ

イヤホンは、その形状と耳への結合方法によって次のように分類されます。
(図 1 を参照)

- サークムオーラル(またはアラウンドイヤヤー) イヤホンは、外耳 を完全に囲み、外耳を囲む頭の表面に置かれます。外耳には触れるかもしれませんが、圧迫はしません。
- 上耳 (またはオンイヤヤー) イヤホンは、外耳に置かれます。
- イントラコンチャ (またはインイヤヤー) イヤホンは、耳の甲介腔 (外耳道のすぐ外側のくぼみ) 内に収まるように設計された小さなイヤホンです。
- インサートイヤホンは、外耳道に部分的または完全に挿入することを目的とした小型のイヤホンです。
- 甲介上イヤホン (図 1 には表示されていません) は、甲介腔の尾根に装着することを目的としています。

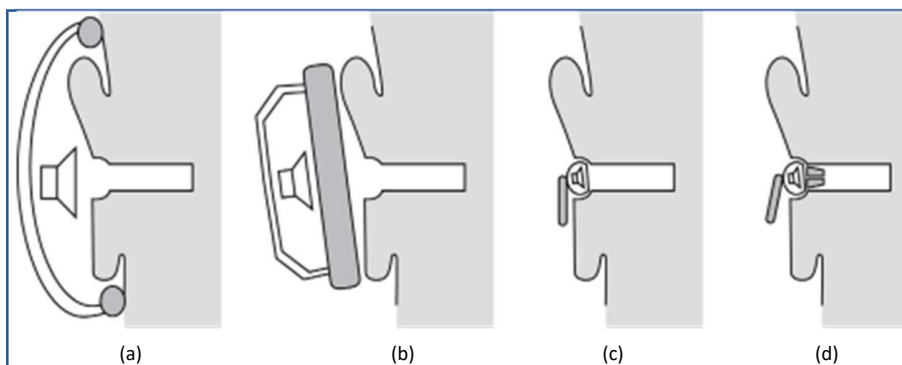


図 1.
ヘッドホンタイプ
(a) アラウンドイヤヤー
(b) オンイヤヤー
(c) インイヤヤー
(d) インサート.

ヘッドホン測定とアコースティック

音場—自由音場と拡散音場

ヘッドホンとイヤホンを検討する場合、音場の概念、特に自由音場と拡散音場の両極端が重要です。自由音場は、少なくとも目的の周波数範囲内で音響反射がまったくない環境として定義されます。ラウドスピーカーの周波数応答は、自由音場で測定する必要があります。この環境では、音波はラウドスピーカーから放射され、反射されることはありません。そのため、音場内の測定マイクは直接音しか測定できません。実際には、ラウドスピーカーの測定は通常、吸音材のサイズに依存しますが、最小周波数を超える周波数の自由音場の無響室で行われます。

拡散音場は自由音場の反対です。拡散音場では、音波はすべての方向に等しい確率でランダムに移動し、長期の rms サウンド レベルはすべての場所でほぼ同じです。拡散音場は、残響室（ほとんど音を吸収しない硬い音響反射面を持つ特別な部屋）で作成できます。たとえば、ヘッドホンの周囲ノイズの減衰を測定する場合、拡散音場は通常、残響室でランダム ノイズを生成するラウドスピーカーによって作成されます。

周波数応答

周波数応答は、ヘッドホンとラウドスピーカーにとって重要な（そして広く議論されている）測定です。これは一般に、知覚される品質を最も示す特性であると考えられています。周波数応答は伝達関数測定です。電気音響デバイスの場合、単位電圧入力ごとにデバイスから放射される音響信号の大きさと位相を、空間のある点で測定された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、振幅応答のみ（位相ではなく）を参照し、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 1 kHz で 0 dB を通過するように、基準周波数（たとえば、1 kHz）での値に正規化されます。

オーディオ エレクトロニクスの場合、フラットな周波数応答は実現可能です。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、スムーズでフラットな周波数応答を実現することは困難です。いくつかの一般的なラウドスピーカーのレビューでは、最大 20 dB のフラットネス (50 Hz ~ 20 kHz) からの偏差が示されました。それにもかかわらず、ラウドスピーカーの比較的滑らかでフラットな応答を達成することは可能であり、 ± 3 dB のフラットネスからの偏差は「立派」と見なされます。おそらく、ラウドスピーカーにはフラットな応答が望ましいという事実を認識して、ラウドスピーカーに関する IEC 60268-5 規格は、ラウドスピーカーの周波数応答が逸脱する周波数範囲の尺度である「実効周波数範囲」と呼ばれる測定基準を指定しています。最大レベル応答の点を通る平坦な線は 10 dB 以内です。

頭部伝達関数

ヘッドホンとイヤホンの測定は、音場と耳の相互作用によって複雑になります。図 2 は、頭部伝達関数 (HRTF) の概念を示しています。図 2 の「マイク」と表示された青い曲線は、自由音場で軸上のマイクによって測定されたラウドスピーカーの周波数応答 (フラットな応答になるようにイコライズ) を表しています。赤い曲線は、DRP の耳とラベル付けされています。ドラム基準点 (DRP) は、鼓膜を表す外耳道の端にある点です。この曲線は、元のマイクと同じ自由音場内の同じ位置に配置された典型的な人の鼓膜で測定される、同じフラット ラウドスピーカーの周波数応答を表しています。赤の Ear at DRP 曲線は HRTF です。これには、音源から空気を通して鼓膜に到達する際の音響信号に対する人の体、頭、耳介、外耳道の影響が含まれます。この HRTF の注目すべき特徴的な機能は、約 3 kHz を中心とした約 17 dB のゲインを持つ広いピークと、約 8 kHz を中心としたノッチです。3 kHz でのピークは、カスケードされた 2 つの効果の結果です。(1) 外耳道の音響共鳴により約 10 dB のブーストが発生し、(2) 頭の障害物効果により 10 dB のブーストが発生します。4 kHz を中心に約 10 dB 。8 kHz のノッチは耳介ノッチと呼ばれ、鼓膜に直接伝わる音波と外耳の特徴から反射する波との間の破壊的な干渉によって引き起こされます。

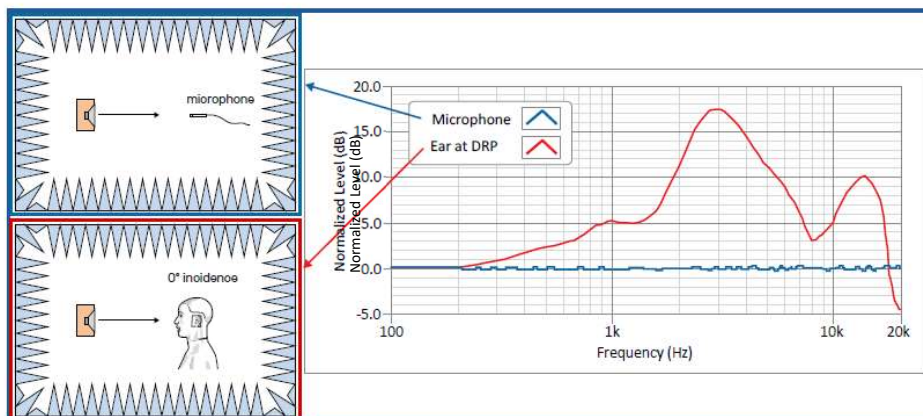


図 2.
ドラム基準点または DRP で
フリー フィールド マイクとイ
ンイヤーマイクによって測
定された、フリー フィールド
でフラットにイコライズされた
ラウドスピーカの周波数
応答。

図 2 に示す HRTF は、被験者に対して 1 つの特定の方向（被験者の真正面および水平面内）に対するものです。外耳、頭、および胴体の形状により、リスナーの周囲の 3 次元空間における音源の位置ごとに異なる HRTF があります。たとえば、図 3 は、KEMAR マネキンの周囲の水平面で 90 度離れた位置の 4 つの HRTF を示しています。これらの HRTF の違いは、環境内の音の位置を特定する高度に発達した能力の重要な部分です。

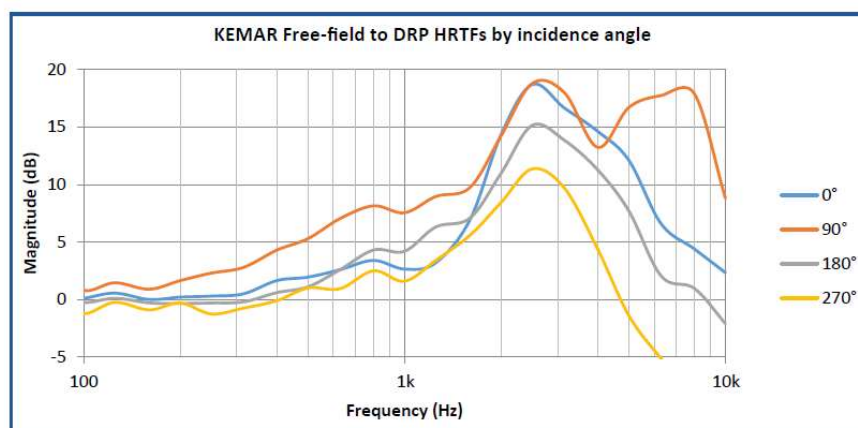
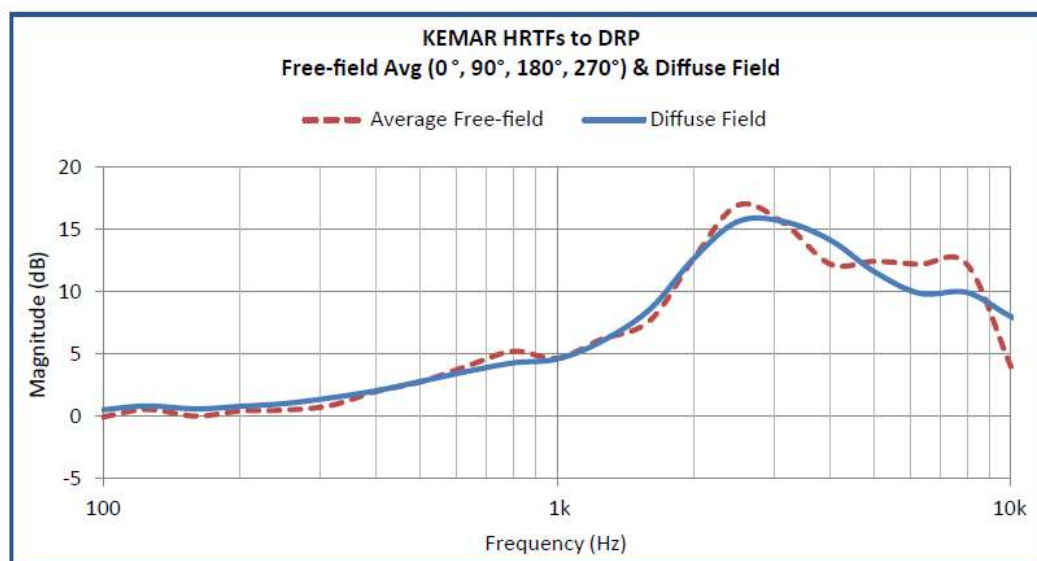


図 3.
4 地点における HRTF
・90 度間隔
・KEMAR マネキンの水平面
で測定

自由音場内の被験者の周囲のすべての位置を表す多数の HRTF が平均化されると、得られる周波数応答曲線は拡散音場応答に近づきます。たとえば、図 4 は、図 3 の 4 つの HRTF の平均を拡散フィールド HRTF と共に示しています。4 つの HRTF のみが含まれているため、平均応答はすでに拡散フィールド応答に非常に近いことに注意してください。拡散音場 HRTF は、拡散音場で理想的にフラットなラウドスピーカーにより外耳道で測定される周波数応答を表します。

図 4. 図3の拡散音場応答における HRTF の平均値



アコースティックテストフィクスチャーを使ったヘッドホン測定

ヘッドホンとイヤホンは耳に密接に結合されているため、自由音場で周波数応答を測定することはできません。(1) 人間の耳によってヘッドホンに与えられる音響インピーダンス (または負荷)、および (2) イヤホンと外耳および頭部 (または耳甲介および外耳道) との相互作用をシミュレートする、何らかの形式の音響試験治具を使用する必要があります。(インサートイヤホンの場合) これは通常、1 つまたは複数の閉塞耳シミュレータを備えた音響試験治具 (ATF) を使用して達成されます。閉塞耳シミュレータは、典型的な人間の耳と同等の音響インピーダンスを持つように設計された特殊なタイプのカプラーです。これには、鼓膜を代表するポイントで音を測定する様に配置された校正済み測定マイクが含まれています。

頭部および胴体シミュレーター (HATS) は、音響試験装置の 1 つのタイプです。HATS は、腰から頭のとっぺんまで上向きに伸びるマネキンで、中央値の人間の成人によって生成される音響ピックアップ特性と音響回折をシミュレートするように設計されています。HATS には、1 つまたは 2 つのタイプ 3.3 イヤー シミュレーターが装備されている場合があります。これは、IEC 60318-4 (以前の IEC 60711) 閉塞耳シミュレーターと外耳道延長および耳介シミュレーターの組み合わせで構成されます。図 5 は、GRAS Sound and Vibration によって製造された KEMAR と呼ばれる HATS の一例を示しています。現在利用可能な 3 つの主要な HATS システムの HRTF は、デンマーク工科大学の論文で公開されています。

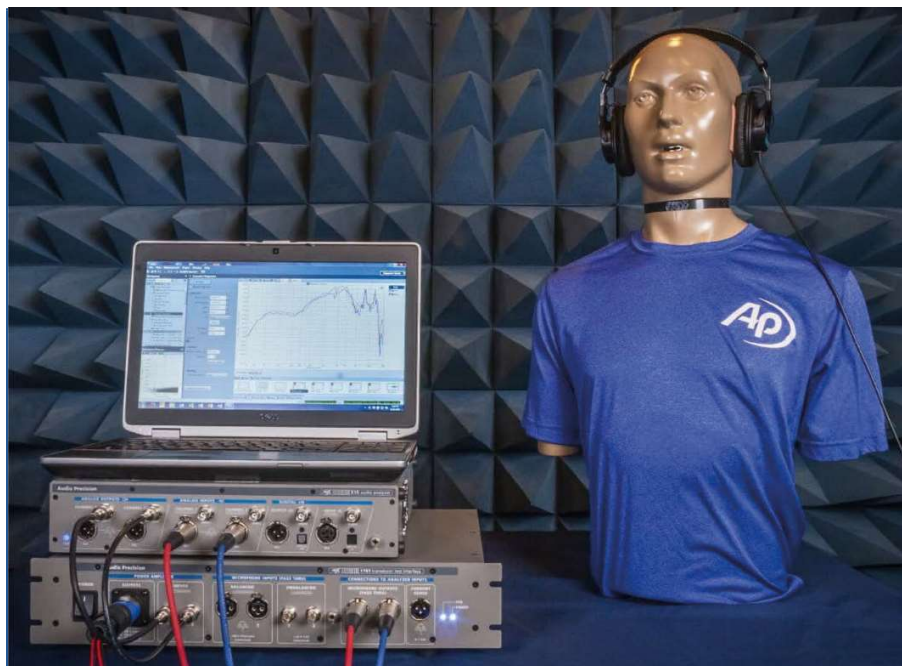


図 5.
Kemar と呼ばれる頭部胴体
シミュレーター

HATS は間違いなくヘッドホン測定に使用できますが、比較的高価です。さらに、ヘッドホンのテストでは、HATS の全ての機能は実際には必要ありません。これは、イヤホンを耳に密接に結合することで、頭の大部分と胴体全体が音響音場に影響を与えないようにするためです。ヘッドホンのテストには、より単純な音響テスト治具を使用できます。このような ATF の一例は、図 6 に示す GRAS 45CA です。45CA の主な寸法は、ISO 4869-3 で説明されているように、平均的な成人の頭部の寸法に近似しています。45CA には、2 つの IEC 60318-4 イヤーシミュレーターと解剖学的形状の耳介シミュレーターが装備されており、高度な音響ノイズ分離を提供します。そのため、45CA ヘッドホンテストフィクスチャは、特にヘッドバンドまたはネックバンドを使用するステレオヘッドホンのテストに適しています。差込型イヤホンにも使用でき、遮音性が高いので、アクティブノイズキャンセリング搭載のヘッドホンやイヤホンのテストにも役立ちます。



図 6.
GRAS 45CA ヘッドホンテスト
フィクスチャー

図 7 に、2 つの単純な音響テストフィクスチャーを示します。左側の ATF は、「耳と頬のシミュレータ」と呼ばれます。タイプ 3.3 のイヤー シミュレーターが 1 つと外耳周囲に平らな面があり、サーカムイヤホンを密閉できます。名前に「頬」という言葉が使われているのは少し紛らわしいです。フィクスチャーが実際にシミュレートするのは頬ではなく、耳覆い型イヤホンが密閉する外耳を囲む人間の頭の部分だからです。この ATF は、上記のどのタイプのイヤホンのテストにも使用できますが、もちろん、一度にテストできるのはステレオ ヘッドホンまたはイヤホンの片側だけです。また、ヘッドバンドまたはネックバンドを備えたヘッドホンをテストするのにもあまり便利ではありません。ヘッドバンドに装着した状態でイヤホンを固定具に取り付けるのは難しい場合があります、場合によってはイヤホンをバンドから取り外す必要があります。また、付属のバネ式クランプを使用して、ヘッドバンドまたはネックバンドのクランプ力をシミュレートする必要があります。



図 7.
GRAS Sound & Vibration.
Type 43AG Ear(右)と
Cheek Simulator(左)
と Type 43AC 人工耳

ヘッドバンド付きヘッドホンのテストの利便性に加えて、2 つのイヤー シミュレータで ATF を使用する利点の 1 つは、左右のトラッキングやクロストークなどのデュアル チャネル測定が可能であることです。

挿入型イヤホンのテストには、図 7 の右側に示すような音響テストフィクスチャを使用できます。この場合、インサートイヤホンは外耳道に直接挿入されるため、外耳と周囲の「頬」プレートは必要ありません。この ATF には、挿入型イヤホンと外耳道との相互作用をシミュレートするように設計された外部アダプターがあります。必要に応じて、バネ仕掛けのクランプを使用して、ヘッドバンドまたはネックバンドの圧力をシミュレートできます。この ATF で測定されたインサートイヤホンの周波数応答は、耳介と外耳道拡張機能を備えたイヤースミュレータで測定されたものとは異なることに注意してください。

ヘッドホン周波数応答の設計目標

自由音場応答

図 2 を考慮すると、イヤホンが自由音場で理想的にフラットなラウドスピーカーのように聞こえる（つまり、最小のスペクトル色）には、その周波数応答が位置の HRTF に直接一致する必要があると結論付けるのが合理的であることがわかります。聞き手の前で。これは、自由場応答設計目標として知られています。このターゲットは、ヘッドセットまたはハンドセットを使用した電話での会話が、フリーフィールドでの対面会話の音響体験に近づけることを目的として、電話のハンドセットおよびヘッドセットに使用されます。どうやら、自由音場応答は、オーディオ業界の初期の高品質ヘッドホンの設計目標でもあったようです。

拡散音場応答

1980 年代、スタジオモニターヘッドホンのオーディオ規格に拡散音場が基準条件として追加されました。この場合、ヘッドホン設計のターゲット応答曲線は、図 4 の拡散音場応答曲線になります。この変更はおそらく、リスニング環境が決して無響ではないという事実を認識して行われたものであり、拡散音場は自由音場よりも典型的なリスニング環境となってきました。

このテーマに関する最近の研究は、リスナーが上記の自由音場および拡散音場のヘッドホンターゲット周波数応答曲線に代わるものを好むことを示しています。最近のある研究では、一般的に、訓練を受けたリスナーは、自由音場または拡散音場のターゲット応答よりも、参照リスニングルームで調整されたフラットラウドスピーカーに対応するヘッドホンのターゲット応答を好むことがわかりました。これは、ステレオ録音が部屋のラウドスピーカーで再生されたときに楽しむために最適化されていることを考えると理にかなっています。

イヤースミュレータを使用して ATF で測定されたヘッドホンの周波数応答を考慮する場合、目標の応答がフラットではないことに留意することが重要です。これに関しては、2つのオプションがあります。最初のオプションは、測定された（正規化された）周波数応答と同じグラフに設計目標曲線を表示することです。これを図 8 に示します。これは、拡散音場および自由音場の設計目標曲線でプロットされた ATF で測定された、耳覆い型ヘッドホンの 1 つのモデルの周波数応答を示しています。このアプローチにより、測定された周波数応答を評価する際に、測定された曲線とターゲット曲線を頭の中で比較することができます。

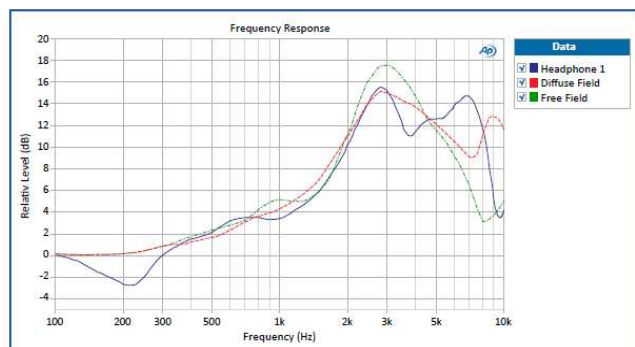


図 8

自由音場と拡散音場のヘッドホンの周波数応答
(ヘッドホンは サークムオーラル / アラウンドイヤー型)

測定されたヘッドホン周波数応答を評価するための 2 番目のアプローチは、測定された応答をターゲット応答に「補正」または参照することです。これは、ターゲット応答曲線を反転し、測定された応答に EQ 曲線として適用することによって達成されます。これを図 9 に示します。この図では、図 8 で測定されたヘッドホンの応答が拡散音場と自由音場に補正されています。このアプローチでは、目標の応答に完全に一致するヘッドホンの補正された応答は、0 dB で平坦な線になります。

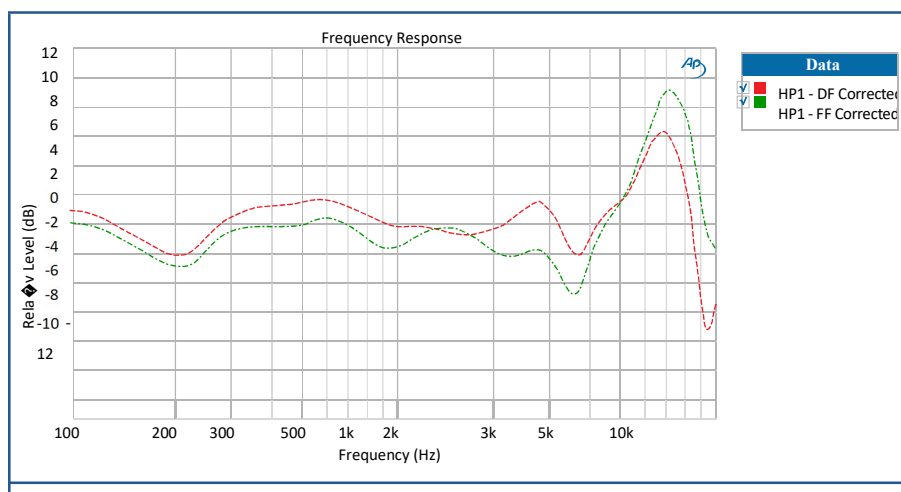


図 9.

図8のヘッドホンの自由音場、拡散音場で補正した周波数応答

アコースティックテストフィクスチャーを使った周波数応答測定

IEC 60268-7 で規定されているヘッドホンの周波数特性を測定する主な方法の 1 つであり、「カプラーまたはイヤーシミュレータ (HATS を含む) の周波数特性」と呼ばれています。これは、ヘッドホンに正弦波電圧が印加されたときの、周波数の関数としてのイヤーシミュレータの音圧レベルの変化として定義されます。この規格では、正弦波信号に加えて、ノイズ信号またはインパルスを使用した測定から周波数応答を推定することができます。ただし、非正弦波信号を使用する場合、テスト結果がサイン波ベースの方法と同等であることを実証するのはテストターに依存します。

Farina ログ掃引サインチャープ刺激に基づいて周波数応答を測定する手法が 2000 年に導入され、それ以来、この手法はラウドスピーカーやヘッドホンなどのオーディオデバイスの周波数応答を測定するための好ましい方法になりました。この方法では、目的の周波数範囲で連続的に変化する非常に短い時間 (10 分の 1 秒から数秒) のサイン波刺激を使用します。測定は非常に高速で、高調波歪みや、Rub and buzz も音響周波数応答と同時に測定できるという利点があります。同じ手法を使用して、インピーダンス対周波数を測定できます。このドキュメントに示されている周波数応答測定はすべて、対数掃引サインチャープ法を使用して行われました。

代替測定方法を使った周波数応答

標準 IEC 60268-7 は、音響試験器具での測定に加えて、ヘッドホンまたはイヤホンの周波数応答を評価するためのいくつかの代替方法を提供しています。これらの方法はすべて、被験者と自由音場または拡散音場の使用を伴います。これらの方法のうちの 2 つは主観的なものです。被験者は、開いた耳を使用して、ヘッドホンと（自由または拡散）音場で交互に提示される帯域制限されたノイズ信号を聞き、次に、知覚されるラウドネスが等しくなるまでヘッドホン信号のレベルを調整します。他の 2 つの方法では、（自由音場または拡散音場の）音場で、同じ帯域制限されたノイズ信号をヘッドホンと開放耳で聞いたときに、人間の被験者の外耳道内に小さなブローブマイクを使用して測定したサウンドレベルを比較します。人間の被験者を含むこれらのフィールド比較方法は、複数の被験者が必要であり、周波数応答を 1/3 オクターブの周波数帯域で一度に 1 バンドずつ測定する必要があるため、ATF での測定よりもはるかに複雑で時間がかかります。

IEC 60268-7 によると、周波数応答測定 of 2 つのカテゴリ（ATF と音場比較）がある理由は、「普遍的に適用できる方法がまだ開発されていない」ためです。規格の別の注記には、「広帯域の無色の再生を生成すると主観的に判断されたイヤホンからフラットな周波数応答特性を生成する既知の客観的な方法はありません。」これは、フラットな周波数応答が好ましいという一般的なコンセンサスがある IEC 60268-5（拡声器）と比較して、IEC 60268-7（ヘッドホンおよびイヤホン）の実効周波数範囲特性の欠如を説明しています。

ヘッドホン測定手順

定格ソースインピーダンス

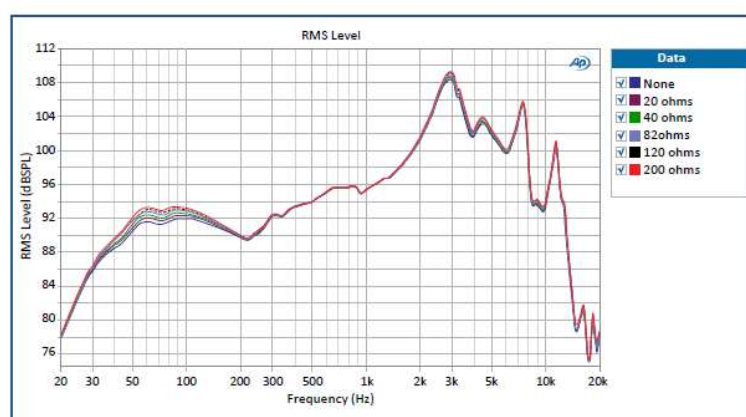
IEC 60268-7（周波数応答を含む）で説明されているほとんどの測定では、標準では、テスト信号を製造元の「定格ソースインピーダンス」と直列にヘッドホンに適用する必要があります。これは、適用力や使用温度範囲など、メーカーの仕様書に記載されているいくつかの「定格条件」の 1 つです。

ただし、いくつかのヘッドホンデータシートによると、ほとんどのヘッドホンメーカーは定格ソースインピーダンスを指定していないようです。規格には、この主題に関する次の注記が含まれています。

「ヘッドホンの性能は、ソースインピーダンスにはほとんど依存しません。しかし、生成される音圧レベルに関して、インピーダンスが大きく異なるヘッドホンを、他の機器の単一のヘッドホン出力に合理的に適合させるために、IEC 61938 で規定されている利用可能なヘッドホンの最低と最高のインピーダンスの間である $120\ \Omega$ のソースインピーダンスを指定しています。したがって、特に何らかの理由で $120\ \Omega$ でない場合は、メーカーが定格ソース インピーダンスを指定することが重要です。」

性能がソースインピーダンスにほとんど依存しないという記述を明確にするために、図 8 で参照されているヘッドホンの周波数応答を、ソースインピーダンスが $20 \sim 200\ \Omega$ の範囲で変化する場合に直列に測定しました。これらの結果を図 10 に示します。図 10 で「None」とラベル付けされた曲線は、パワーアンプの内部ソース インピーダンス（この場合は約 $0.1\ \Omega$ ）に追加の抵抗を追加しなかった測定に関連しています。このヘッドホンの公称インピーダンスは $63\ \Omega$ です。

図 10 様々なソースインピーダンスにおける周波数応答



ソースインピーダンスに関しては、ヘッドホンの性能への影響に関係なく、テスターはヘッドホン測定に使用されるアンプのソースインピーダンスを注意深くチェックして記録する必要があります。計測器品質のパワー アンプのソースインピーダンスは $0.1\ \Omega$ 未満であり、テストしたヘッドホン ジャック付きの高品質 DAC のソースインピーダンスは $0.8\ \Omega$ でした。AV レシーバーは、この点であまり予測できません。最近テストした「サラウンド サウンド」受信機のヘッドホンジャックのソースインピーダンスは $1.3\ \text{k}\Omega$ でした。

標準測定条件

IEC 60268-7 で規定されているほとんどの電気音響測定では、測定を行う前にヘッドホンを「測定のための標準条件下に置く」必要があります。これらの標準的な測定条件は次のとおりです。

- イヤホンは、メーカーの定格でイヤースミュレーターに適用する必要があります。
- イヤースミュレータで 94 dB SPL の音圧レベルが測定されるように、500 Hz のサイン波電圧が定格ソースインピーダンスと直列に印加されます。
注: ヘッドホン入力で測定されるこの電圧は、特性電圧とも呼ばれます。
- ボリュームコントロールがある場合は、最小の減衰に設定する必要があります。プリアンプを使用するヘッドホンとワイヤレスヘッドホンの場合、メーカーは測定用の基準ゲイン設定を指定する必要があります。
- バランス コントロールが存在する場合は、バランスが均等になるように設定する必要があります。
- クロストーク制御がある場合は、最小のクロストーク条件に設定致します。
- ヘッドホンに電源が必要な場合は、定格電圧と周波数に設定する必要があります。

イヤースミュレータの校正

ATF のイヤースミュレータには、電圧を生成するマイクが含まれています。ドラム基準点での音圧に比例します。通常、各マイクロフォンの感度は、指定された公称値とはわずかに異なります。ほとんどの場合、ユーザーはこれらの入力をオーディオアナライザーに「キャリブレーション」して、アナライザーがスケールリングされた両方のチャンネルの結果をパスカル (Pa) および 20 Pa に対するデシベル (dB SPL) の圧力単位で表示するようにします。これは真のキャリブレーションではなく、各イヤースミュレータの感度を V/Pa 単位で対応する入力チャンネルに割り当てる方法です。マイクの感度は、イヤースミュレータに付属のキャリブレーションデータシートから読み取ることができますが、シミュレータを使用する場合は、サウンドレベルキャリブレータまたはピストンホンを使用してこれらの値を設定または検証することをお勧めします。これらのデバイスは、イヤースミュレータに適切に接続すると、既知の音圧レベル（通常は 250 Hz で 114 dB SPL）の正弦波信号を生成します。図 11 に示すように、アダプタを使用して、イヤースミュレータの外耳道拡張部にキャリブレータを取り付けます。



図 11.
GRAS 社 42AA ピストフォンを
使って Gras45CA ヘッドホンテ
キスチャを校正したイメージ

フィットの重要性

イヤホンの頭部や外耳へのフィット感は、パフォーマンスに劇的な影響を与える可能性があります。これは、密閉型ヘッドホンの低音レスポンスに特に当てはまります。いかなる種類の漏れも、イヤホンが低周波で音を生成する能力を低下させます。たとえば、図 12 は、ヘッドホン（図 8 で紹介）の 5 つの周波数応答測定を示しています。この場合、ヘッドホンは ATF から取り外され、各測定の前に再度装着されました。このばらつきをフィット感で説明するには、ヘッドホンを取り外して測定のために再装着して、いくつかの測定（通常は 3 ～ 5 回）の結果を平均することをお勧めします。

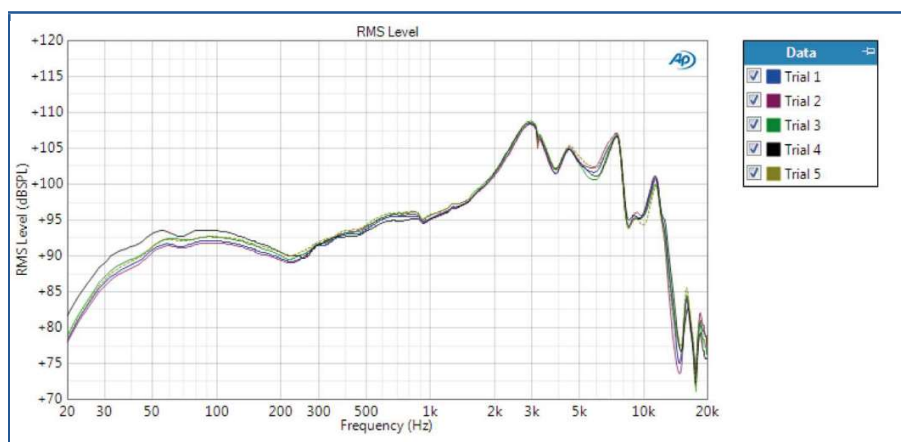


図 12.
ATF でヘッドホンを 5 回設置し直
し、ヘッドホンを周波数応答測定し
た結果。

挿入型イヤホンを図 12 と同様の測定を図 13 に示します。この場合、フィットによる変動は高周波数（6 kHz 以上）で最も顕著です。試行ごとに挿入深度を調整することで、閉じた外耳道の共振周波数が変化します。外耳道の開口部を完全に密閉するため、インサートイヤホンの拡張された低音レスポンスに注意してください。

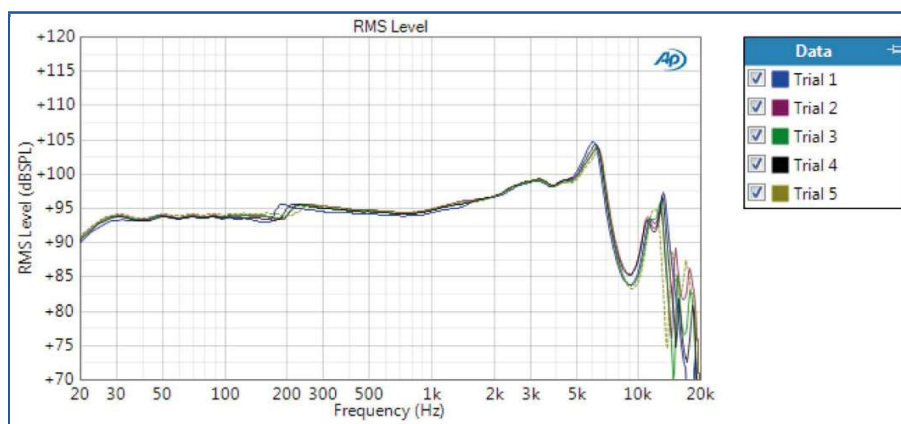
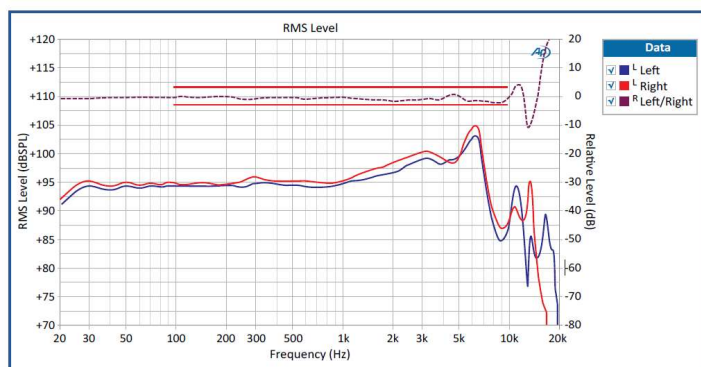


図 13.

挿入型イヤホンの周波数応答測定の結果 (ATFで5回イヤホンを設置し直しております。)

左右のトラッキング

IEC 60268-7 では指定されていませんが、左/右トラッキングは、ヘッドホンの各イヤホンの相対的な応答を測定するため、ステレオ ヘッドホンの有用な測定基準です。これは、左右の耳からの応答を比較することにより、2つのイヤースミュレータを使用した ATF の周波数応答測定から簡単に導き出されます。完全に一致するイヤホンの左/右トラッキング応答曲線は、0 dB で平坦になります。図 14 に示すように、インサートイヤホンの左右のイヤホンは 20 Hz から 10 kHz までよく一致しています。



図

インサートイヤホンの左右の周波数応答測定の結果 (左軸) と ± 3 dB 以内の左右のトラッキング応答カーブ (右軸)

クロストーク

クロストークは IEC 60268-7 のセクション 8.12 でカバーされていますが、実際には周波数応答測定の特殊なタイプです。周波数特性や左右トラッキングと同時に測定すると便利です。右から左へのクロストークを測定するには、左のイヤホンが駆動され、右のイヤホンが駆動されていないときの左耳シミュレータでの応答を測定するだけです。次に、右チャンネルを駆動し、左チャンネルを駆動しない状態で測定を繰り返します。これら 2 つの曲線の比率は、右から左へのクロストークです。

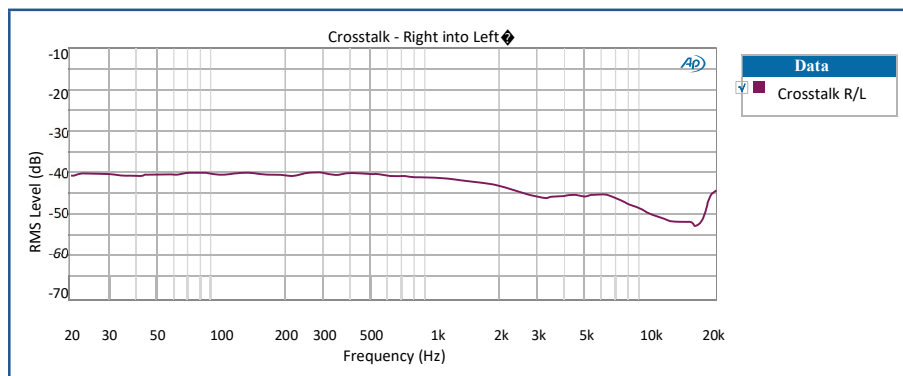


図 15.
イヤホンのクロストーク測定(右→左)

周囲ノイズの考慮

音響測定を行う場合、騒音環境のない測定結果を得るには、周囲の騒音レベルが低いテスト環境が非常に望ましいです。これは特に歪み信号成分が刺激信号である歪み測定に当てはまり、テスト環境の周囲ノイズが高すぎる場合、このノイズは測定アルゴリズムによって歪みとして解釈される可能性があります。

音響測定を行うときは、周囲の騒音を測定することをお勧めします。周波数応答を測定しながら周囲ノイズスペクトルを推定する簡単な方法の 1 つは、発生器のスイッチをオフにして測定を行うことです。図 16 は、3 つの信号レベルでのヘッドホンの一連の周波数応答測定を示しています。1 つは特性電圧 V_{ch} (500 Hz で 94 dB SPL になる電圧)、もう 1 つは $V_{ch} - 6$ dB、もう 1 つはジェネレータを OFF に切り替えた状態です。これらの測定は、他の従業員がいない典型的なオフィス環境で実施されました。ノイズ スペクトルのさまざまなピークは、建物の暖房、換気、および空調 (HVAC) システムと近くのコンピューター冷却ファンからのノイズによるものです。この測定値は信号対ノイズ比が比較的高いように見えますが、一部の周波数でのノイズレベルは、良好な歪み測定には過剰に近いものです。たとえば、580 Hz のノイズピークは、この周波数の約数 (290 Hz、193 Hz など) で計算された全高調波歪み (THD) 比の推定値に影響することに注意してください。重要な測定には、優れたノイズ分離を備えた部屋またはチャンバーが必要です。

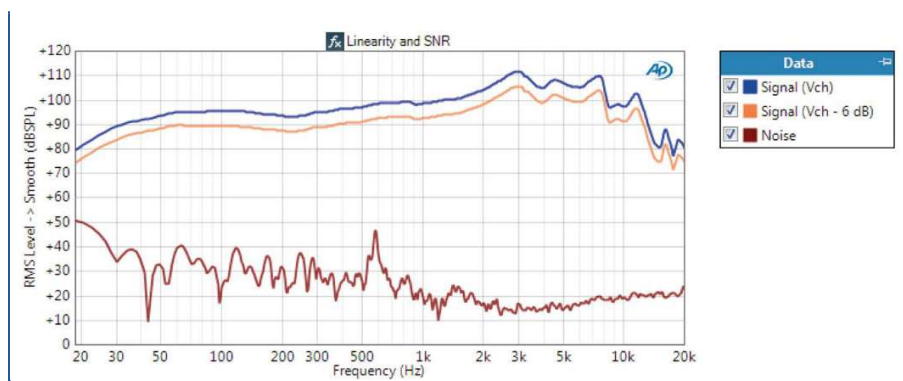


図 16.

H 三つの信号レベル ($V_{ch} - 6$ dB, V_{ch} 、no signal) でのイヤホンの周波数応答測定

電気インピーダンス

ヘッドホンとパワーアンプのマッチングには、電気インピーダンスが重要です。IEC 60268-7 では、ヘッドホンに定格インピーダンスが必要です。この公称インピーダンスは、整合目的でメーカーが指定した純粋な抵抗の値です。この規格では、ヘッドホンの測定されたインピーダンス振幅対周波数曲線が、定格周波数範囲内の任意の周波数で定格値の 80% を下回らないようにする必要があります。

インピーダンスを求めるには、ヘッドホンへの電圧入力と回路内の電流を周波数の関数として測定する必要があります。通常、対数的に掃引されたサイン波信号が 20 Hz ~ 20 kHz で使用されます。電流を測定するには、通常、「検出抵抗」が使用されます。これは、小さな (1.0 または 0.1 Ω などの) 精密抵抗器です。ヘッドフォンと直列に配置。センス抵抗両端の電圧降下は、電流の計算に使用されます。

インピーダンスは、ヘッドホンが線形領域で動作するように十分に低い一定の駆動レベルで測定する必要があります。これは、数デシベル離れた 2 つのレベルで音響周波数応答を測定することで簡単にテストできます。たとえば、図 16 の曲線 $V_{ch} - 6$ dB と V_{ch} は、dB SPL の差 (Pa での比率) をとることによって比較され、結果の比較曲線は 1 kHz に正規化されました。この結果を図 17 に示します。完全に線形なシステムの場合、結果は 0 dB で平坦になるはずです。

電圧と電流はそれぞれフェーズまたは複素量であり、大きさと位相 (または実数部と虚数部) の両方を持つため、インピーダンスも同様です。ただし、定格インピーダンスを評価するときは、インピーダンスの大きさの曲線のみが考慮されます。図 18 は、ヘッドホンの測定インピーダンス曲線を示しています。(図 8 で紹介) 線はヘッドホンの公称定格インピーダンス 63 Ω の 80% の値を示します。

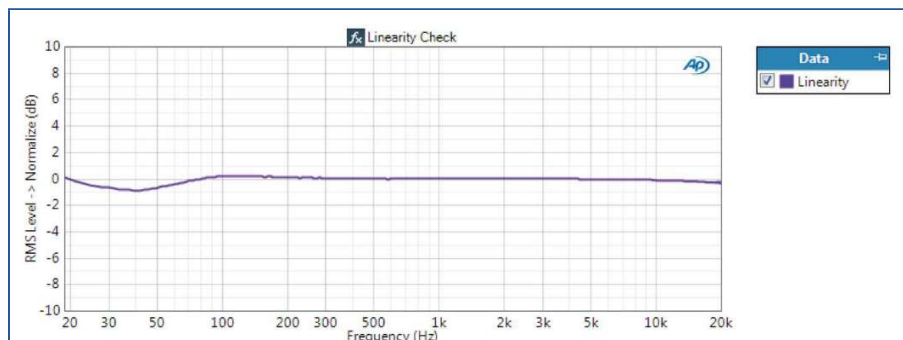


図 17.
線形性の確認
6dB 離れた二つのドライブヘッド
ホンのレベル応答

インピーダンス測定は、標準測定条件を要求する IEC 60268-7 の測定の 1 つです。つまり、ヘッドホンテキスチャで試験を実施する必要があります。図 18 の自由空気測定は、測定されたインピーダンス振幅曲線に対する音響負荷の影響を示すために含まれています。

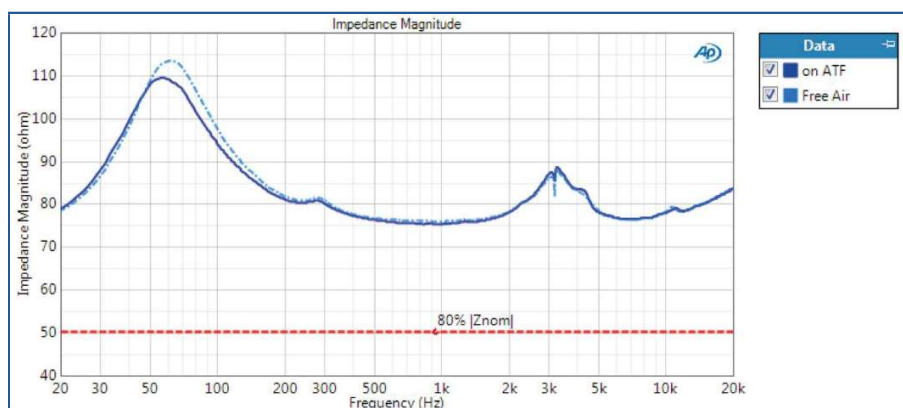


図 18.
ATF で測定したインピーダンス
振幅曲線とヘッドホン（図
8 で紹介）の自由音場での
測定結果
点線はインピーダンスが無い
値の 80%の値を示しています。

入力電圧

入力電圧は、ヘッドホンが動作する電圧を指定するため、重要要素です。

プログラムシミュレーション信号

IEC 60268-7 は、ヘッドホンの入力特性電圧をいくつか指定しています。その多くは、プログラムシミュレーション信号と呼ばれる特別なノイズ信号に基づいています。信号は、図 19 に示すゲイン応答を持つ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作成されます。これは、プログラム素材（音楽とスピーチ）の長期的な平均スペクトルを表すことを意図しています。規格のパート 7 では、特定の波高率が 1.8 ~ 2.2 の範囲内にある信号の変形も必要です。

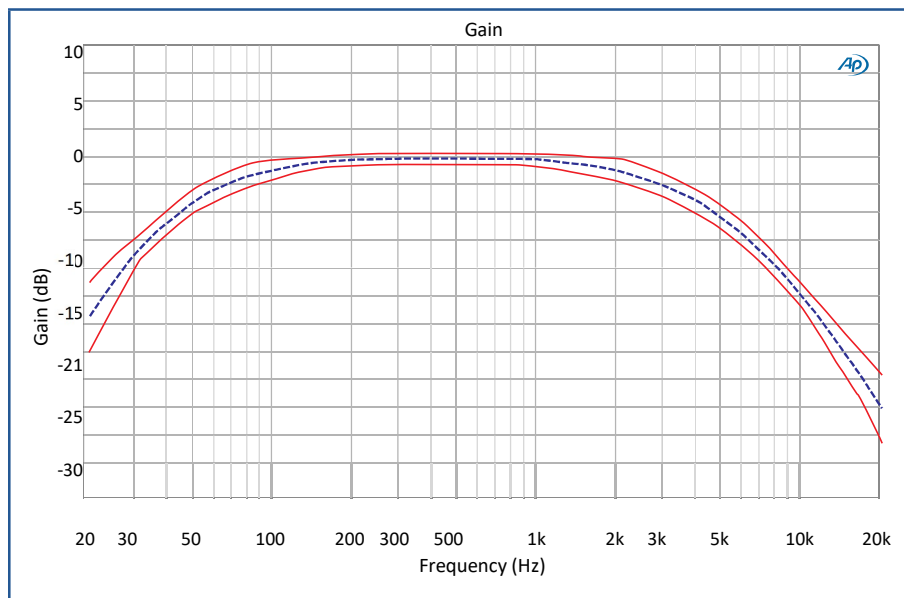


図 19.

(青線) IEC60268-1 に基づいたプログラムシミュレーション
(赤線) 上下限線.

IEC 60268-7 で規定された入力電圧特性は以下の要素が含まれています。

- Rated source e.m.f.: 通常のプログラム信号の再生中に、定格ソースインピーダンスを介してヘッドホンに印加する必要があるメーカー指定の最大 rms 電圧。
- Rated long-term maximum source e.m.f.: プログラム シミュレーション信号の波高率制限バージョンを使用して、1 分間の信号印加と 2 分間の休止を 10 サイクル行った場合に、永久的な損傷なしにヘッドホンが許容できる最大電圧。
- Rated maximum permanent noise source e.m.f.: 上記の項目 2 と同様ですが、信号が 100 時間連続して適用される点が異なります。
- Characteristic voltage: 500 Hz のサイン波信号が定格ソースインピーダンスを介して印加される電圧は、イヤースミュレータで 94 dB SPL の音圧レベルを生成します。
- Simulated program signal characteristic voltage: シミュレートされたプログラム信号が定格ソースインピーダンスを介して印加される電圧は、イヤースミュレータで 94 dB SPL の音圧レベルを生成します。
- Simulated program signal characteristic voltage corrected by A-weighting and free-field response compensation: イヤースミュレータで測定された音圧レベルが A 特性で自由音場に補正されていることを除いて、上記の項目と同じです。

これらの入力電圧特性は、オーディオ アナライザを使用して簡単に測定できます。オーディオ アナライザには、IEC 60268-1 プログラム シミュレーション ノイズ信号 (クレスト ファクタの低減あり/なし)、信号発生器を指定されたレベルに調整する機能、長時間の測定 rms レベル、周波数重み付けフィルタ、および入力 EQ として知られる機能により、イヤースミュレータで測定された応答を自由音場に補正するなどの機能が含まれています。

注：IEC 60268-7 は、指定された入力電圧特性に対応する入力電力特性も指定しています。これらは、公称定格ヘッドホンインピーダンスを使用して電圧特性から導き出すことができます。

音圧レベル

IEC 60268-7 の音圧レベル (SPL) セクションでは、前のセクションの入力電圧が適用されたときにヘッドホンが生成する音圧レベルを決定する方法を指定しています。指定された特性は次のとおりです。

- Maximum SPL: 定格ソースインピーダンスと直列のソース起電力で 500 Hz のサイン波電圧でヘッドホンを駆動したときにイヤースミュレータで生成される音圧レベル。
- Working SPL: ヘッドホンの公称定格インピーダンスに対して 1 mW に相当するレベルの定格ソースインピーダンスと直列の 500 Hz サイン波電圧でヘッドホンを駆動したときに、イヤースミュレータで生成される音圧レベル。
- Simulated program signal working SPL: Working SPL と同様ですが、500 Hz サイン波の代わりにプログラムシミュレーション信号が使用されます。
- Simulated program signal working SPL corrected by A-weighting and free-field response compensation: Stimulated program signal working SPL と同様ですが、イヤースミュレータで測定された音圧レベルが A 重み付けされ、自由音場に補正されている点が異なります。

図 8 に示したヘッドホンの公称インピーダンスは 63 Ω です。この負荷への 1 mW に対応する電圧は 251 mV です。このヘッドホンの動作音圧レベルは 94.9 dB SPL でした。この場合、特性電圧 (226 mV) での入力電力は 1 mW に非常に近かった。

オーディオアナライザを使用すると、シミュレートされたプログラム信号の動作 SPL を簡単に判断できます。イヤースミュレータで直接測定したバージョン (Simulated program signal working SPL) では、ヘッドホンへの rms 入力電圧を比較的長い積分期間 (10 秒以上) で測定する必要があります。この測定値に基づいて、発電機のレベルを必要に応じて調整して、1 mW の目標レベルを達成することができます。ターゲットに到達したら、アナライザを使用してイヤースミュレータで rms レベルを測定できます。

A 重みづけおよび自由音場補正バージョンの場合、手順は同じですが、A 重みづけフィルタと、DRP HRTF の自由音場の逆数に対応する EQ 曲線 (図 2) が入力に挿入されます。ヘッドホンの場合、Simulated program signal working SPL は 99.7 dB SPL で測定され、A 重みづけおよび自由音場補正された working SPL は 89.7 dBA で測定されました。

図 20 は、プログラムシミュレーション ノイズ信号で駆動されたヘッドホンの ATF のイヤースミュレータで測定された長期 1/24 オクターブ SPL スペクトルを示しています。3 つのスペクトルが表示されます: 重みづけなし (DRP)、自由音場補正、および A 特性重み付けで補正された自由音場。重み付けされていない曲線は、刺激が広帯域ノイズであるため、自由音場 HRTF によく似ていることに注意してください。

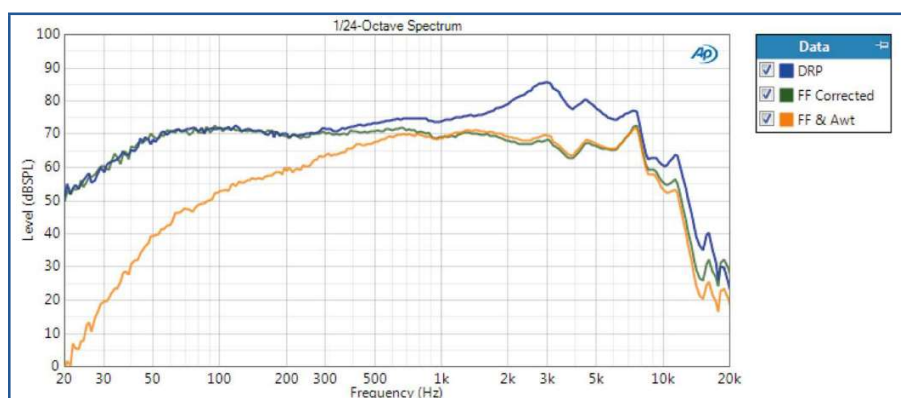


図 20.

- (a) IEC 60268-1 に即した 1mW でプログラムシミュレーション信号で駆動した際の 1/24 オクターブスペクトル
- (b) 重みづけなしの参照ポイント
- (c) A 特性の重みづけされた自由音場特性

関連する欧州規格 (BS EN50332) は、騒音による難聴を制限する目的で、ポータブルメディアプレーヤーで使用されるヘッドホンとイヤホンの最大音圧レベルを測定する方法をカバーしています。

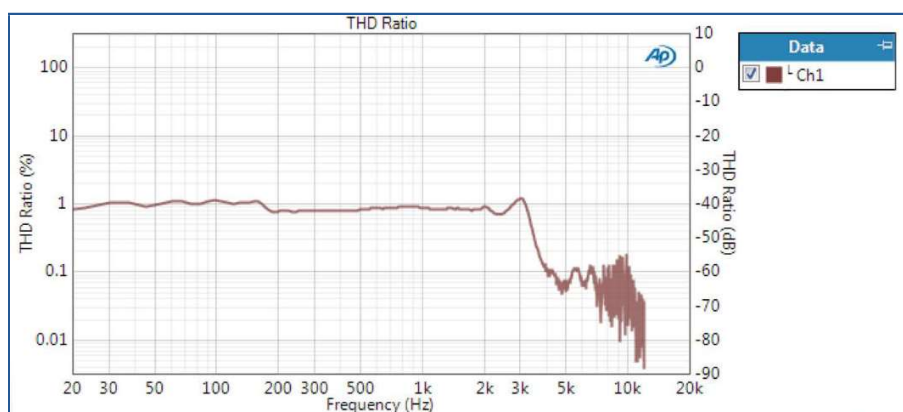
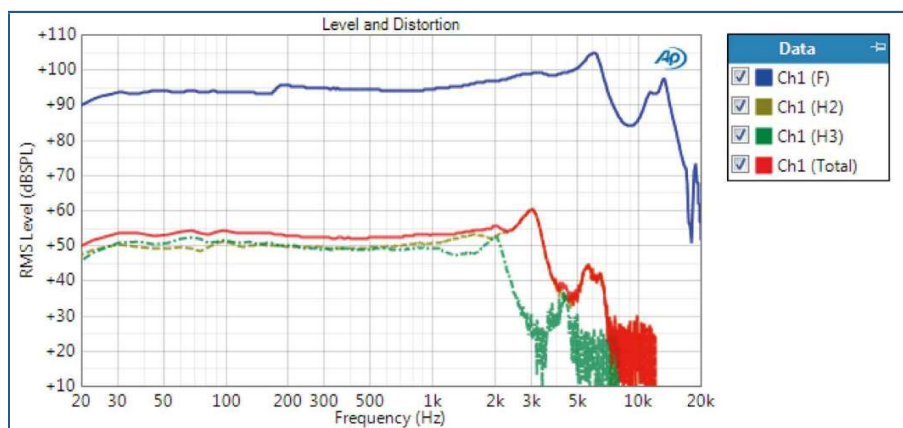
歪み

IEC 60268-7 は、振幅の非線形性というタイトルのセクション 8.7 で歪みをカバーしています。高調波歪みと 2 種類の相互変調歪みが規定されています。

高調波歪み

周波数応答を測定する対数サインチャープスイープ方法の利点の 1 つは、高調波歪みを音響応答と同時に測定できることです。IEC 60268-7 では、2 次および 3 次の高調波歪みのみを指定して測定する必要があります。

図 21 は、図 13 で導入されたインサートイヤホンのレベルと歪みのプロットを示しています。このプロットは、2 次高調波と 3 次高調波 (H2 と H3) の歪み積のレベルと、全高調波歪みを示しています。THD レベルは、約 20 Hz ~ 3 kHz の基本信号レベルより約 40 dB 低く、THD 比は -40 dB または約 1% になります (図 22)。



相互変調歪み

IEC 60268-7 のセクション 8.7.3 は、指定された 2 種類の相互変調歪みの 1 つである変調歪みをカバーしています。この場合、指定された特性は、信号が 2 つのサイン波 (1 つは 70 Hz、もう 1 つは 600 Hz) で構成される場合の 2 次および 3 次の相互変調歪み比です。4:1 の振幅比。2 つの正弦波の信号レベルは -1.9 dB である必要があります。および -4.0 dB、定格入力電圧に対してそれぞれ。2 次変調歪み率は、530 Hz と 670 Hz の 2 次 IMD 積の和から計算され、600 Hz の正弦成分のレベルに対する比率として表されます。3 次変調歪みは、460 Hz と 740 Hz の 3 次積から同様に計算されます。

図 21.

インサートイヤホン 1 のレベルと歪みのプロットは、耳介と外耳道拡張機能を備えた ATF の特性電圧の測定結果。

図 22.

T 図 21 と同様の測定方法で行った挿入型イヤホン歪み率

図 23 は、必要な信号で駆動されたときのインサート イヤホンの FFT スペクトルを示しています。スペクトルは 600 Hz のサイン波成分のレベルに対する dB 単位でプロットされています。この測定では、2 次および 3 次の変調歪率は、それぞれ -36.3 dB および -32.1 dB でした。

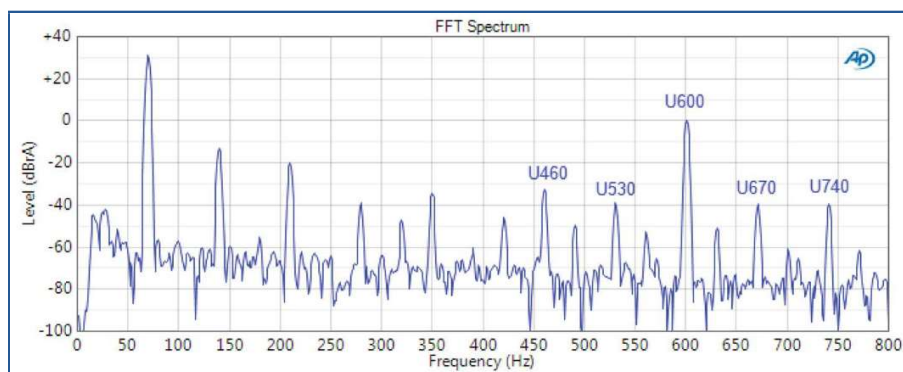


図 23.

70 Hz と 600 Hz の変調歪み信号を受けたインサート イヤホン 1 の FFT スペクトル。2 次および 3 次の相互変調歪み成分も示されています。

差分周波数歪み

差分周波数歪み (DFD) は、IEC 60268-7 で指定されている相互変調歪みの 2 番目のタイプです。この測定では、周波数が 80Hz 離れた 2 つの正弦波信号を使用し、それぞれ定格入力電圧の半分です。歪みの積は、全体的な信号レベルの比率として表されます。正弦周波数を掃引して、DFD スペクトルを作成できます。図 24 は、平均周波数が 250 Hz から 20 kHz まで掃引された DFD スペクトルを示しています。

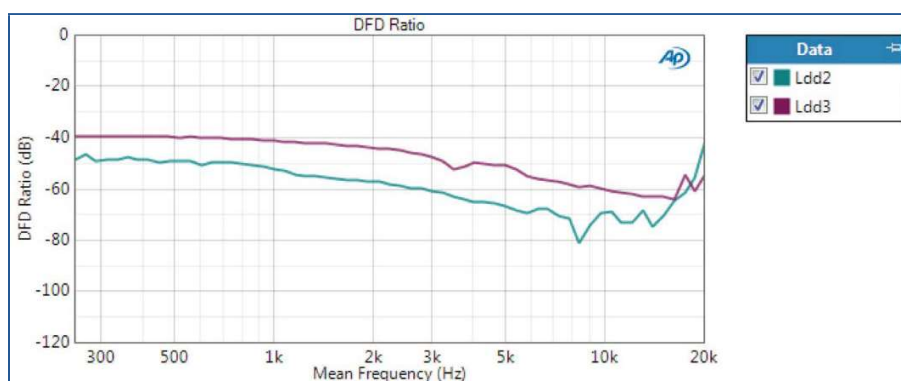


図 24.

インサートイヤホンの差周波数歪みスイープ。Ldd2 と Ldd3 は、それぞれ 2 次と 3 次の歪み積です。

相互変調歪み測定は、刺激周波数よりも低い周波数で歪み成分が発生するため、帯域幅が制限されたシステムで特に役立ちます。このようなシステムでは、基本信号の周波数が高くなると、高調波歪み成分が測定帯域幅を急速に超えます。

Rub and Buzz 歪み

Rub and buzz は、IEC 60268-7 では扱われていないタイプの歪みですが、ヘッドホンメーカーにとって、特に製造テスト測定として関心のあるものです。Rub and buzz の欠陥は、多くの場合、使用して検出するのが難しい場合があります。古典的な歪み測定。オーディオ プレシジョン APx500 オーディオアナライザには、ログスイープと連携するオプションの Rub and buzz 検出アルゴリズムがあります。サインチャープ周波数応答測定。これは、Rub and buzz が通常、本質的に「スパイキー」な高周波信号をもたらすという事実に基づいています（つまり、波高率が高い）。それが使用する測定基準の 1 つは、Rub and buzz のクレストファクタと呼ばれます。これは、通常、基本周波数よりも 10 ~ 20 倍高い周波数で信号をハイパスフィルタ処理した後、信号のクレストファクタを計算することによって導き出されます。アルゴリズムは、既知の正常なデバイスに基づいて制限を設定することで「トレーニング」できます。ただし、これまでの経験から、欠陥のないドライバは通常、Rub and buzz の波高率が約 13 dB 未満であることが示されています。

図 25 は、Bluetooth ノイズキャンセリングヘッドホンのセットで測定された Rub and buzz クレストファクタを示しています。左のイヤホンは、約 25 ~ 125 Hz の周波数範囲で 13 dB をはるかに超えるクレストファクタを持っていました。実施前にこのテストでは、音楽を聴いているときにこれらのヘッドホンに問題は見られませんでした。ただし、その後、25 ~ 125 Hz の範囲のサイン波信号で駆動すると、左のイヤホンで buzz の欠陥がはっきりと聞こえました。

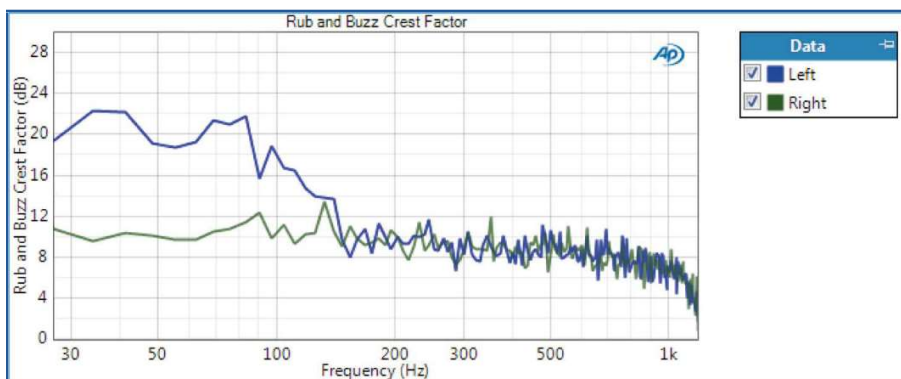


図 25.
ノイズキャンセリング Bluetooth
ヘッドホンで測定された Rub
and buzz のクレストファクタ。
左のイヤホンは、25 ~ 125 Hz
の周波数範囲のサイン波信号
で駆動すると、非常に耳障りな
音がしました。

音の減衰

音の減衰は、周囲の騒音が外耳道に入るのをヘッドホンまたはイヤホンがどれだけ効果的に遮断できるかの尺度です。これは、アクティブノイズキャンセレーション (ANC) を搭載したヘッドホンのメーカーにとって特に重要です。IEC 60268-7 は、聴覚保護具の規格である ISO 4869-1 に従って音響減衰測定を行うことを規定しています。ANC ヘッドホンについて簡単に言及していますが、「変更された手順が必要になる可能性がある」と述べているだけです。

ISO 4869-1 は主観的な測定方法であり、聴覚保護具を装着している場合と装着していない場合の 16 人の被験者の聴力閾値の測定に基づいています。これはおそらくヘッドホンの音の減衰を測定する最も正確な方法ですが、そのような測定は困難で時間がかかります。ANC ヘッドホンに適したより便利な方法は、ISO 4869-3 に基づいており、音響テストフィクスチャーを使用する方法です。

ISO 規格 4869-3 では、ATF の周囲にランダム入射音場または平面進行波音場を作成する必要があります。これには、音場の種類ごとの詳細な要件と、音場が要件に準拠していることを確認するための測定が含まれています。ピンクノイズなどの広帯域信号が生成され、ATF のイヤースミュレータのサウンドレベルが 1/3 オクターブバンドで測定されます。ANC のないヘッドホンの場合、最初に開放耳（ヘッドホンを取り外した状態）の 1/3 オクターブサウンドレベルスペクトルを測定し、次にヘッドホンを装着した状態で測定を繰り返す必要があります。挿入損失は、これらのスペクトルの差として計算されます。ANC 付きのヘッドホンの場合、追加の手順が必要です。測定は、ANC 機能を有効にして、または有効にせずに実施され、そこからパッシブおよびアクティブ減衰値が計算されます。図 26 に示すように、測定されたスペクトルは通常、測定された開耳スペクトルに対して正規化されます。このグラフは、アクティブノイズ減衰が有効であることを示しています。また、約 1.5 kHz から 4 kHz の周波数範囲では、パッシブ減衰のみよりも効果が低くなります。

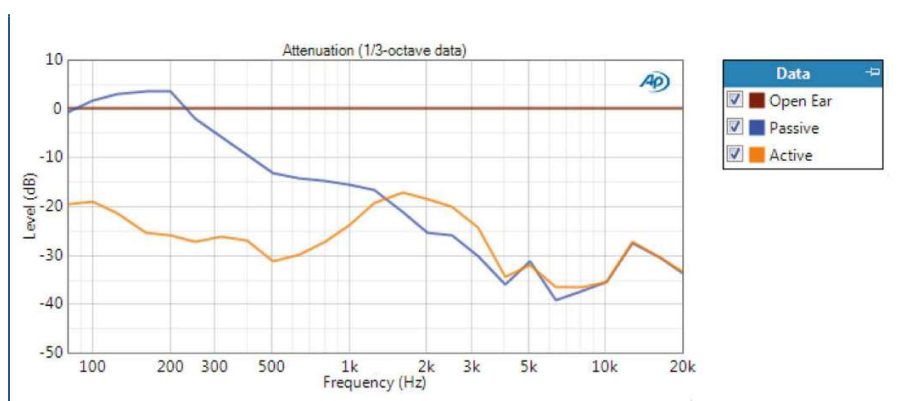


図 26.

パッシブおよびアクティブ減衰を示す ANC ヘッドホンの 1 つの測定から正規化されたスペクトル

詳細は以下のリンクを参照願います。

<https://www.ap.com/download/appnote-headphone-electroacoustic-measurements/>