



Application Note: ヘッドホンの電気音響測定

Introduction

本アプリケーションノートでは、音楽やその他のオーディオ用ヘッドホン/イヤホンの音質を特徴付けるのに重要な電気音響測定（Electroacoustic Measurements）の概要を説明します。これらの測定はヘッドセット(*1)にも適用できますが、ヘッドホン(*2)として使用する場合に限定されます。

イヤホンは耳に密接して装着され、音響伝達経路を考慮するため、測定は複雑になります。本アプリケーションノートでは、ヘッドホン測定における課題、種類、測定基準、音響特性、測定に必要な治具/アクセサリ、測定の実際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。

本アプリケーションノートでは以下の測定項目（Measurement）を扱います。

- Frequency Response
- Electrical Impedance
- Input voltages
- Sound Pressure Level
- Distortion
- Noise Attenuation
- Crosstalk Attenuation

Industry Standards

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しょう。測定方法や条件に関して業界の専門家間で合意が得られていることが理想的です。これにより、意味を持ち再現性のある方法でデバイスがテストされることを保証できます。ヘッドホン測定に関する主要な国際規格で、本アプリケーションノートでは *IEC 60268-7, Sound system equipment, Part 7: Headphones and earphones* を参照しています[1]。

Headphone/Earphone Types

ヘッドホン/イヤホンは、形状と装着方法によって次のように分類されます（Figure 1 参照）。

- a) サークム・オーラル（オーバーイヤー）型：外耳（耳介）部を完全に覆い、外耳周囲の頭部に装着します。外耳に接触する場合がありますが、強く圧迫はしません
- b) スープラ・オーラル（オンイヤー）型：外耳（耳介）に装着します

(*1) IEC 60268-7 [1]では、イヤホンは耳に近接して装着される電気音響トランスデューサ、ヘッドホンは1つ又は2つのイヤホンのアセンブリ、ヘッドセットはヘッドホンにマイクが付いたもの、と定義しています

(*2) ヘッドセットの通話品質を評価するための測定は、IEEE 269 [2]などの通話規格をご参照下さい。

- c) イントラ・コンチャ（インイヤー）型：耳腔（外耳道のすぐ外側）内に装着する小型イヤホン
- d) インサート（カナル）型：部分的または完全に外耳道に入れて装着する小型イヤホン
- e) スープラ・コンチャ型：耳甲介腔の隆起部に載るように装着するもの（Figure1 に図示無し）

イヤホンは、音響的にオープン／クローズで更に分類されます。オープンイヤホン（アンシールドとも呼ばれる）は外部環境と外耳道との間に音響経路を提供します。クローズドイヤホン（シールドとも呼ばれる）は外部環境と外耳道との間の音響経路を塞ぐものです。

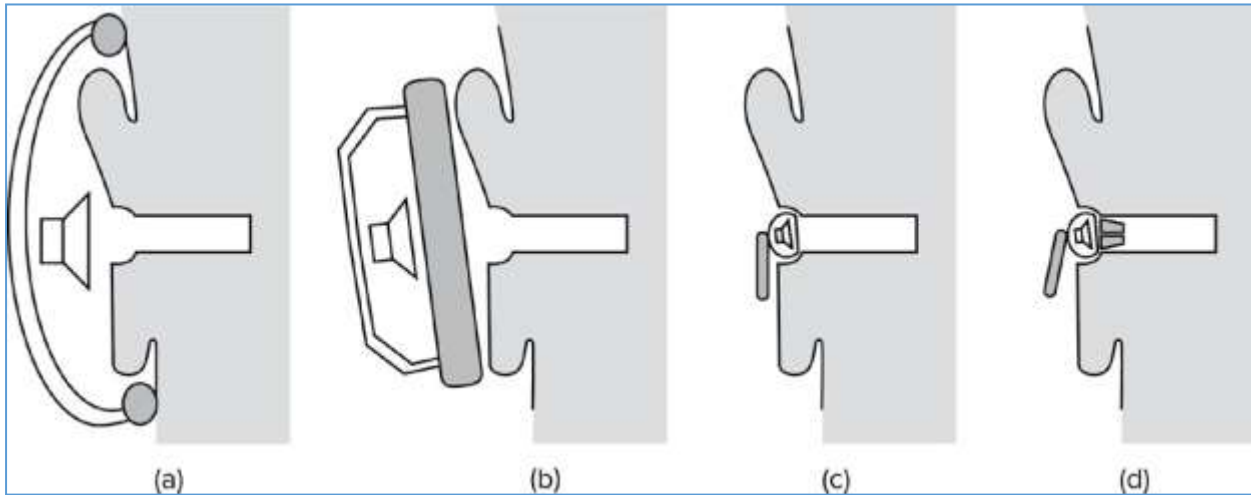


Figure 1. Headphone types (a) circumaural, (b) supra-aural, (c) intra-concha, and (d) insert (adapted from [1]).

Headphone Measurements and Acoustics

Sound Fields—Free and Diffuse

ヘッドホン／イヤホンについて検討する際、音場のコンセプトは重要であり、特に対極にある自由と拡散が重要です。

自由音場は、少なくとも測定対象の周波数範囲内で、反響が全くない環境として定義されます。スピーカーの周波数特性は自由音場で測定する必要があります。この環境において、音はスピーカー後方には反射しないため、測定用マイクで直接音だけを測定することができます。通常、実際のスピーカーの測定は無響室で行われ、自由音場の最小周波数は吸収材のサイズによって決まります。

拡散音場は自由音場とは対極にあり、音は全方向に等しい確率でランダムに広がり、長期 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（ほとんど音響を吸収しない硬い音響反射面を持つ特別な部屋）拡で作り出すことができます。例えば、ヘッドホンの周囲雑音減衰を測定する場合、通常、拡散音場は残響室内のランダムノイズを発生するスピーカーによって生成されます。

Frequency Response

Frequency response is the single most important aspect of the performance of any audio device. If it is wrong, nothing else matters. (Floyd Toole, 2009 [4])

周波数応答は、周知の通り、ヘッドホンとスピーカーの重要な（かつ広く議論されている）測定値です。知覚される品質を最もよく示す特徴であると一般に考えられています。周波数応答は伝達関数の測定値であり、電気音響機器の場合、空間内のある点で測定された周波数の関数として、機器から放射される単位電圧入力当たりの音響信号の大きさおよび位相を表します。機器は、周波数特性の「形状」を比較されることがよくあります。この際、振幅特性のみを指し（位相ではありません）、これを基準に正規化（normalize）されます。例えば、特性の大きさは、ある基準周波数で正規化することができ、1kHzであれば正規化された曲線は1kHzで0dBを通過します。

オーディオエレクトロニクスでは、フラットな周波数特性が実現可能です。例えば、ほとんどのオーディオアンプは、オーディオ帯域（20Hz～20kHz）内で±1dB未満のフラット性を持ちます。±0.1dBも珍しくありません

一方でスピーカーの場合、フラットかつ滑らかな周波数特性を実現するのは様々な要因から難しいとされています。いくつかの一般的なスピーカーの評価では、フラット性（50 Hz～20 kHz）で最大20 dBのバラつきがありました[4]。

とは言え、スピーカーに対して比較的滑らかでフラットな特性を実現することは可能であり、±3dBのフラット性のずれは「Respectable（尊敬に値する）」と考えられます。またフラットな特性がスピーカーに適しているという事実から、IEC 60268-5では、スピーカーの周波数特性がフラットレベルから10dB以下の最大レベル応答をする周波数範囲のスペックである「有効周波数範囲（Effective Frequency Range）」と呼ばれる測定基準を規定しています。

The Head Related Transfer Function

ヘッドホンとイヤホンの測定は、音場と耳との相互作用によって複雑になります。Fig 2に頭部伝達関数（HRTF）の概念を示します。「Microphone」と表示された青い曲線は、自由音場でマイクの軸上で測定したスピーカーの周波数特性を表します（フラットな特性を持つようにイコライズされています）。「Ear at DRP（Drum Reference Point：鼓膜基準点）」と表示された赤い曲線は、元のマイクロホン³と自由音場内の同じ位置にある、一般的な人の耳の鼓膜で測定される同じフラットスピーカーの周波数特性を表しています。赤い「Ear at DRP」曲線はHRTFであり、人の胴体、頭部、耳介および外耳道が、音源から空気を通して鼓膜に伝わる際の音響信号に対する影響が含まれています。このHRTFの特徴的な部分は、約3kHzを中心とする約17dBのゲインと、約8kHzを中心とするノッチを有する広いピークです。3kHzのピークでは、①外耳道の音響共鳴が、約10dBのブースト効果をもたらす②4kHzを中心に約10dBのブースト効果をもたらす頭部の影響[5]の2つの効果があります。8kHzのノッチは、「pinna notch」と呼ばれ、鼓膜に直接伝わる音と耳介の特性を反映する音の相殺的干渉によって引き起こされます。

³ Fig.2のDRPデータの耳は、頭部及び胴体シミュレータ（HATS）と呼ばれる音響研究用の特別な人体モデルであり、一般的な成人の平均値から生成される音響ピックアップ特性および音響回折をシミュレートするように設計されています[3]。

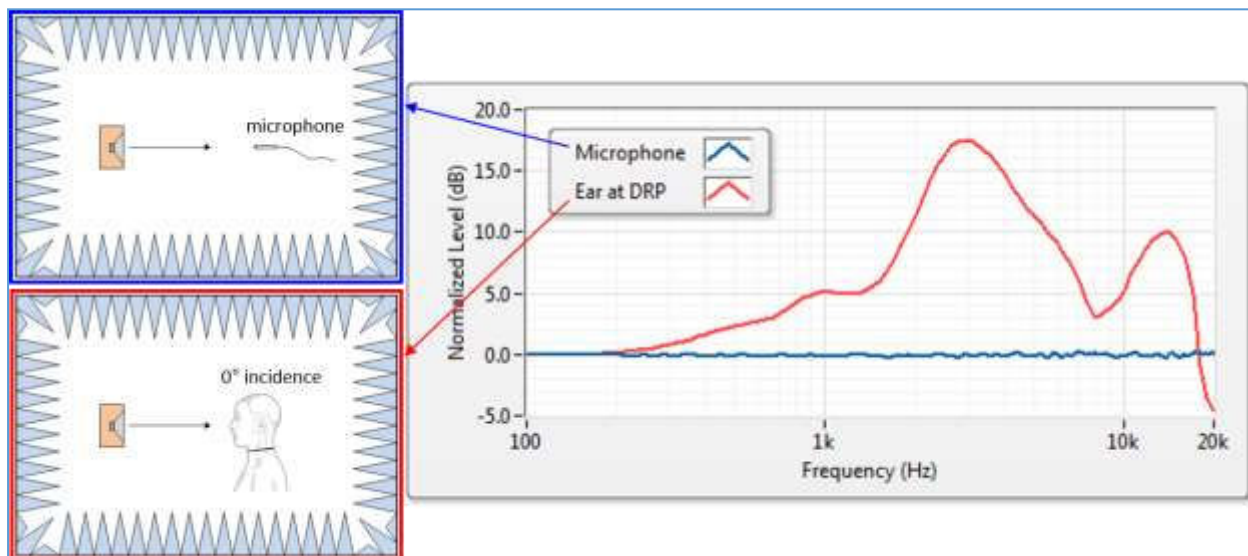


Figure 2. Frequency response of a loudspeaker equalized flat in a free field as measured by a free field microphone and an in-ear microphone at the Drum Reference Point or DRP (DRP data from [3]).

Fig.2 に示される HRTF は、被験者に対して直接的に前面および水平面内の特定の 1 方向に関するものです。耳介、頭部及び胴体の形状により、リスナーの周りの 3 次元空間における音源の各位置に対して異なる HRTF が存在します。例えば、Fig.3 は、KEMAR⁴ マネキンの周囲の水平面内で 90 度離れた 4 つの HRTF を示しています。HRTF のこれらの違いは、環境内の音の位置を正確に特定するために高度に開発された重要な能力です。

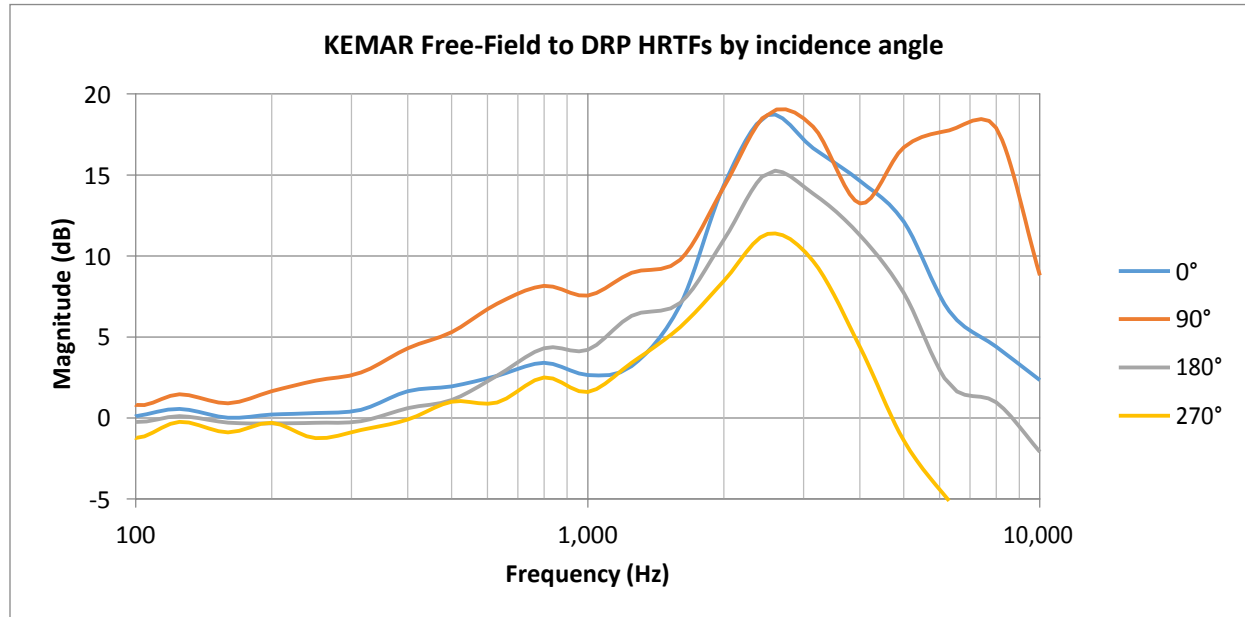


Figure 3. HRTFs for 4 positions 90 degrees apart around a KEMAR manikin in the horizontal plane (data provided by G.R.A.S. Sound and Vibration).

⁴ KEMAR マネキンは頭部及び胴体シミュレータの一種です

自由音場内の被験者の周りのすべての位置を表す十分な数の HRTF が一緒に平均化された場合、得られる周波数特性曲線は拡散音場の特性に近づきます。例えば、Fig.4 は Fig.3 の 4 つの HRTF の平均と拡散音場の HRTF を示していますが、わずか 4 つの HRTF でも、平均特性は拡散音場の特性に非常に近いものになっています。拡散音場の HRTF は、拡散音場における理想的にフラットなスピーカーによる外耳道で測定されるであろう周波数特性を表しています。

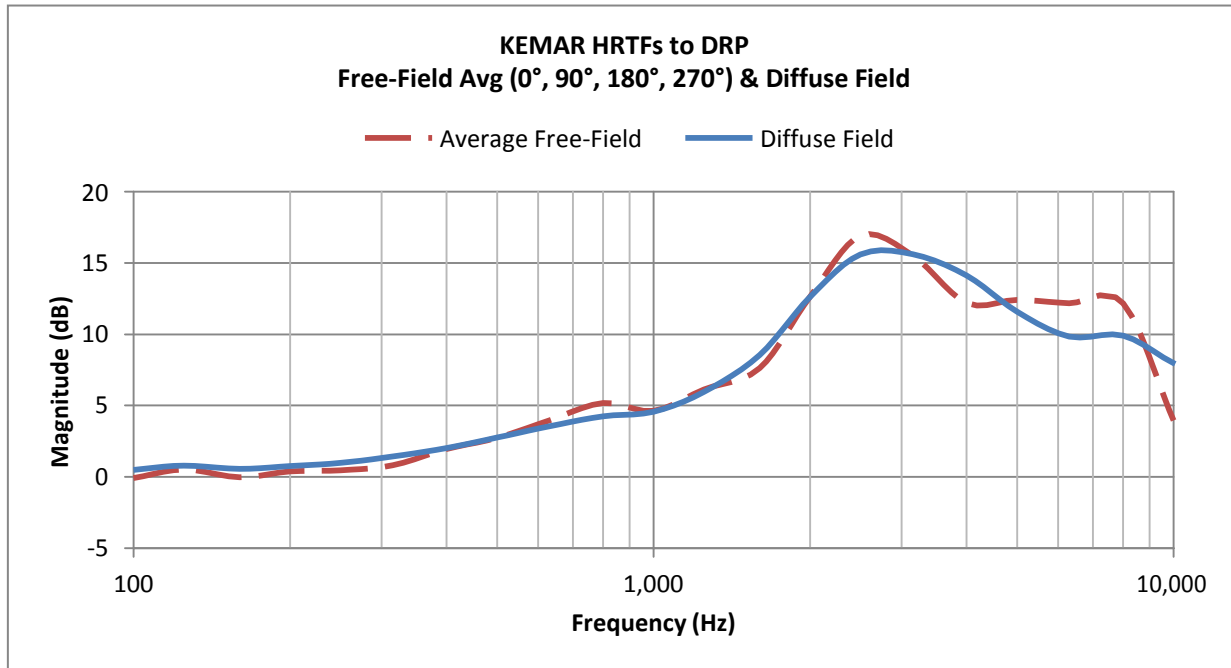


Figure 4. Average of the 4 HRTFs in Figure 3 with the Diffuse Field Response

Acoustic Test Fixtures for Measuring Headphones

ヘッドホンとイヤホンは耳に密接に装着されているため、自由音場で周波数特性を測定することはできません。よって、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）②イヤホンと耳介および頭部（またはインサートタイプのイヤホンの場合に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音響テスト治具（ATF）が必要になります。通常、ATFは1つまたは複数の耳穴式イヤー・シミュレータを備えており、耳穴式イヤー・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有するように設計された特別なタイプのカプラで、鼓膜で音を測定するように配置された較正された測定マイクロホンを内蔵しています。

頭部および胴体シミュレータ（HATS）は、ATFの一種です。HATSは、腰から上の胴体を有するマネキンであり、成人の平均値によって生成される音響ピックアップ特性および音響回折をシミュレートするように設計されています[6]。HATSには、IEC 60318-4（旧IEC 60711）耳穴式イヤー・シミュレータと外耳道延長、耳介シミュレータの組み合わせで構成された1つまたは2つのType 3.3 イヤー・シミュレータ[7]が装備されています。Fig.5は、G.R.A.S.社によって製造されたKEMAR⁵と呼ばれるHATSの一例です。現在入手可能な3つの主要なHATSシステムのHRTFは、Danish Technical Universityの論文に掲載されています。

⁵ KEMAR is an acronym which stands for Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research.



Figure 5. An example of a Head and Torso Simulator called KEMAR, made by G.R.A.S Sound and Vibration.

HATSはヘッドホンの測定に間違いなく使用できますが、比較的高価です。さらに、ヘッドホンを耳に密着させることで頭の大部分は無視され、胴体も音場に影響を与えないため、実際にはヘッドホンの測定にはHATSのほとんどの機能は必要なく⁶、より簡単なATFを使用することができます。その1つの例は、Fig.6に示すAudio Precision AECM206です。AECM206の主要な寸法は、ISO 4869-3 [17]に記載されている平均的な大人の頭部の寸法に準拠しています。AECM206には、2つのIEC 60318-4 [20]イヤール・シミュレータと解剖学的に形成された耳介シミュレータ[7]が装備されており、高度なアコースティックノイズアイソレーションを提供します。したがって、AECM206は、ステレオヘッドホン、特にヘッドバンドまたはネックバンドを使用するヘッドホンのテストに適しています。また、インサートタイプのイヤホンにも使用できます。高いノイズアイソレーションは、アクティブノイズキャンセリング機能付きヘッドホンとイヤホンの測定に有効です。

⁶ Note: ヘッドセットのマイク機能をテストするには、頭部と胴体がマイク周辺の音場に及ぼす影響をシミュレートするためにHATSが必要です。また、HATSにはマウスシミュレータが必要です。



Figure 6. Audio Precision AECM206 headphone test fixture.

2つの簡単な ATF を Fig.7 に示します。左側の ATF は「Ear and Cheek Simulator」と呼ばれています。これにはタイプ 3.3 のイヤール・シミュレータが 1 つ内蔵され、耳介の周りにオーバーイヤール型ヘッドホンを着用できる平面部があります。固定具が実際にシミュレートするものは実際には頬（Cheek）ではなく、むしろ外耳を囲む人間の頭部であり、名称に「Cheek」があることが少々混乱されることがあります。上述のヘッドホン／イヤホンをテストするのに使用できますが、一度に測定できるのはステレオヘッドホン／イヤホンの片側だけになります。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の場合、ヘッドバンドに取り付けた状態でイヤホンを ATF に取り付けることは難しく、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るため、適しているとは言えません。ヘッドバンドまたはネックバンドのクランプは、付属のバネ式クランプを使用してシミュレートする必要があります。

2つのイヤール・シミュレータを持つ ATF を使用する利点は、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、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ンネル測定が可能であることです。



Figure 7. G.R.A.S. Type 43AG Ear and Cheek Simulator (left) and Type 43AC Artificial Ear.

インサートタイプのイヤホンをテストするには、Fig.7の右側に示すようなATFを使用できます。この場合、インサート型イヤホンが外耳道に直接挿入されるため、耳介およびその周囲の「頬」プレートは不要です。このATFには、外耳道とインサート型イヤホン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があります。また必要に応じて、スプリング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圧力をシミュレートすることができます。このATFで測定されたインサート型イヤホンの周波数特性は、耳介および外耳道拡張を伴う耳シミュレータで測定されたものとは異なることに留意する必要があります。

Design Targets for Headphone Frequency Response

Free Field Response

Fig.2から、自由音場内で理想的なフラットスピーカーのように鳴る（すなわち、最小限のスペクトルカラレーションを伴う）ヘッドホンについては、その周波数特性がリスナーの直前の位置のHRTFと厳密に一致するはずであると結論付けられます。これは自由音場設計目標（free field design target）として知られています。これは携帯電話やヘッドセットに使用され、ヘッドセットやハンドセットを使用した通話は、自由音場の対面式会話の音響体験に近づけることを目的としています⁷。明らかに、自由音場特性は、オーディオ業界の初期の高音質ヘッドホンの設計目標でもありました[8]。

Diffuse Field Response

1980年代には、拡散音場がスタジオモニターヘッドホンのオーディオ規格に基準として追加されました[9]。この場合、ヘッドホン設計の目標特性曲線はFig.4のDiffuse Fieldになります。この変化は、リスニング環境が決して無響でなく、自由音場よりも一般的なリスニング環境に近似しているという事実に基づいたものと思われる。

⁷ IEEE 1652 [3]は Orthotelephonic Reference（1メートルの距離にある自由音場で対面会話が行われる）の概念を使用しています。

これに関する最近の研究によれば、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目標周波数特性曲線を好むことが示されています。ある研究[10]では、一般に、訓練されたリスナーが、自由音場または拡散音場目標特性のいずれかで、基準リスニングルームで校正されたフラットスピーカーに対応するヘッドホン特性を好むことを発見しました。これは、ステレオ音源が部屋の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と考えると納得がいくでしょう。

ATF でイヤー・シミュレータを使用して測定されたヘッドホンの周波数特性は、目標特性がフラットではないことに留意することが重要です。この点について2つの選択肢があります。第1の選択肢は、測定された（正規化された）周波数特性と同じグラフ上に設計目標曲線を表示することです。これは、Fig.8（拡散音場および自由音場設計の目標曲線をプロットしたATF上で測定した、サーカム・オーラル（オーバーイヤー）型ヘッドホン（Headphone1）⁸の1つのモデルの周波数特性）に示されており、このアプローチでは、測定された周波数特性を評価する際に、測定された曲線と目標曲線を知覚的に比較することができます。

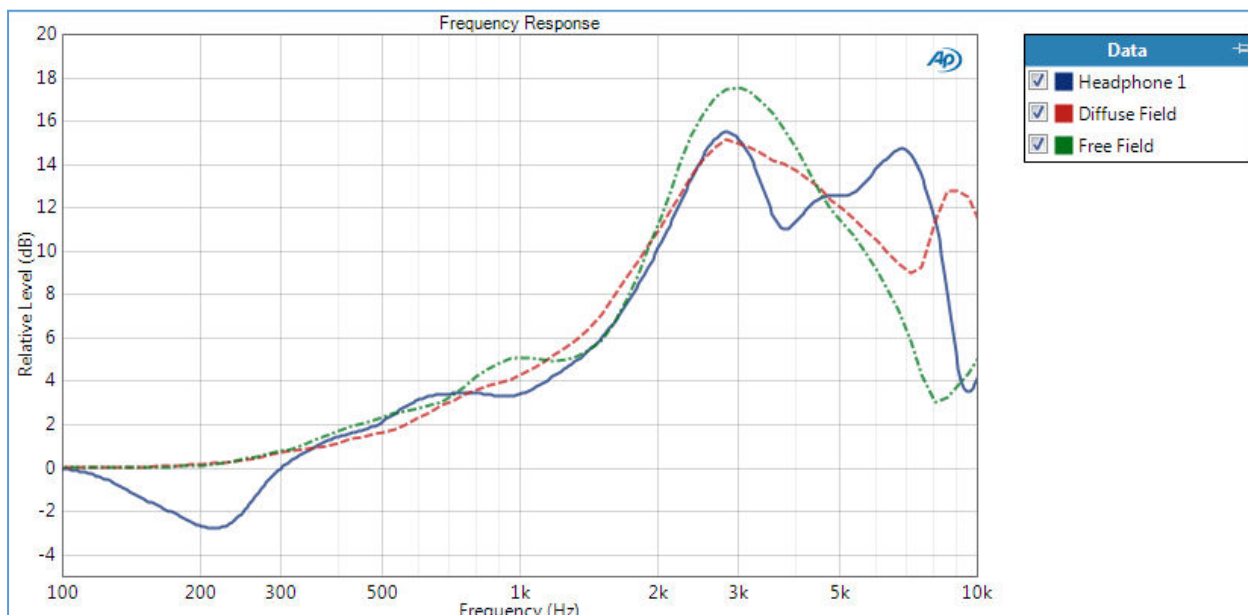


Figure 8. Frequency response of Headphone 1 (a circumaural, closed headphone) with the Diffuse Field and Free Field response curves.

第2の選択肢は、目標特性に対する測定された特性を補正するか、または参照することです。これは、目標特性曲線を反転させ、それをEQカーブとして測定に適用することによって実施されます。これはFig.9に示されており、Fig.8で測定されたヘッドホン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、目標特性と完全に一致するヘッドホンの補正された特性は、0dBのフラットになります。

⁸Headphone 1 は製造元によれば「プロフェッショナルのスタジオとライブ放送用に設計された大きなダイヤフラム」を備えた、サーカム・オーラル（オーバーイヤー）型ヘッドホンです。定価は130ドルで、本アプリケーションノートでは説明のために様々な測定の対象として使用されています。

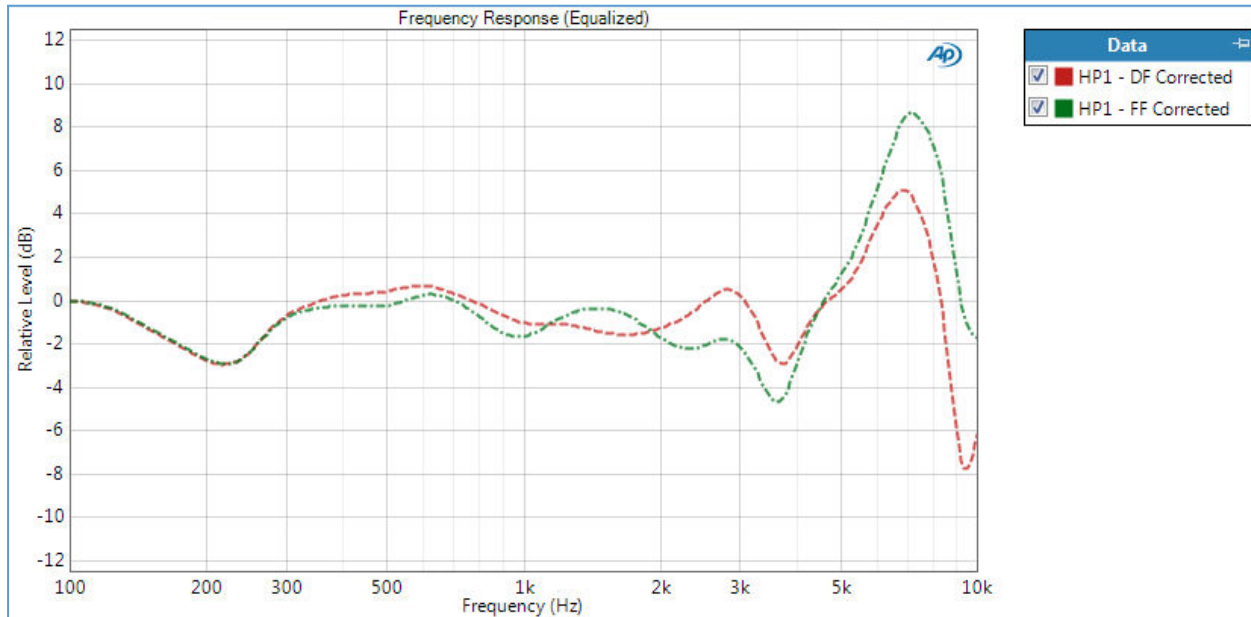


Figure 9. Frequency response of Headphone 1 (as measured in Figure 8) corrected with Diffuse Field and Free Field equalization.

Frequency Response Measurement on an Acoustic Test Fixture

「coupler or ear simulator (including HATS) frequency response」と呼ばれる IEC 60268-7 に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 つです。ヘッドホンに正弦波電圧が印加されたときのイヤール・シミュレータの音圧レベルの変化を周波数の関数として定義したものです。正弦波に加えて、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特性を推定することができます。しかし、正弦波以外の信号を使用する場合、測定結果が正弦波を基準とした方法と同等であることを実証する必要があります。

Farina log-swept sine chirp stimulus[11]に基づいて周波数応答を測定する技術が 2000 年に導入されて以来、この技術はスピーカーやヘッドホンなどのオーディオ機器の周波数特性を測定するための推奨方法となっています。この方法は、非常に短い時間（10 分の 1 秒から数秒まで）で任意の周波数範囲にわたって連続的に変化する正弦波信号を使用します。測定は非常に高速で、音響周波数特性と同時に高調波歪み、Rub-and Buzz distortion を測定できるという利点もあります。同じ手法を使用してインピーダンス vs 周波数を測定することができます。この文書に示されている周波数特性の測定はすべて、log-swept sine chirp 法を使用して行われました。

Frequency Response—Alternative Measurement Methods

IEC60268-7 には、ATF の測定に加えて、ヘッドホンやイヤホンの周波数特性を評価するためのいくつかの代替方法があります。これらの方法にはすべて、人体と自由音場または拡散音場を使用します。これらの方法のうち 2 つは主観的で、被験者は、ヘッドホンと自由音場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取り、同じに感じられるまでヘッドホンの信号レベルを調整します。他の 2 つの方法は、ヘッドホンを通して帯域の制限された同じノイズ信号を聞き、自由音場または拡散音場で、被験者の外耳道内の小さなプローブマイクロホンで測定した音レベルの比較を行います。

⁹ IEC 60268-7 states, “Coupler or ear simulator measurements, purely objective, are relatively simple and repeatability is sufficient. They are, therefore, most useful for production testing, quality control and commercial specifications.”

人体を含むこれらの音場比較方法は、複数の被験者が必要であり、周波数応答を 1/3 オクターブ周波数帯域で測定する必要があるため、ATF での測定よりも非常に複雑で時間を要します。

IEC 60268-7 によれば、周波数特性測定に 2 つのカテゴリ（ATF と音場比較）を有する理由は、「*…no method has yet been developed that is universally applicable.*（ユニバーサルに適用可能な方法はまだ開発されていないため）」です。別の注記では、「*No known objective method produces a flat frequency response characteristic from an earphone which is subjectively judged to produce wide band uncolored reproduction.*（主観的に広帯域で歪のない再生が可能とされるイヤホンから、平坦な周波数応答特性が得られる客観的方法はまだ無い）」と記載されています。これは、IEC 60268-7 (headphones and earphones) の Effective Frequency Range characteristic（有効周波数範囲特性）が、フラットな周波数特性が望ましいとされる IEC 60268-5 (loudspeakers) と比較して不十分であることを示しています。

Headphone Measurement Procedures

Rated Source Impedance

IEC 60268-7（周波数応答を含む）に記載されている測定の多くについて、規格では、テスト信号をメーカーの「定格ソースインピーダンス」と直列にヘッドホンに印加する必要があるとしています。これは動作温度範囲などの「定格条件」のひとつですが、いくつかのヘッドホンのデータシートをレビューしたところ多くのメーカーで「定格ソースインピーダンス」の記載がされていませんでした。規格ではこれについて以下のように記載しています。

「The performance of headphones depends very little on the source impedance. However, in order to allow headphones of widely different impedances to be reasonably well matched, in terms of the sound pressure level produced, to a single headphone output on other equipment, IEC 61938 at present specifies a source impedance of 120 Ω, intermediate between the lowest and highest likely impedances of available headphones. It is thus important for the manufacturer to specify the rated source impedance, particularly if, for some reason, it is not 120 Ω.

（ヘッドホンの性能は、ソースインピーダンスにほとんど依存しません。しかし、インピーダンスが広範囲に異なるヘッドホンを、生成される音圧レベルに対して、他の機器のヘッドホン出力に合理的に整合させるために、IEC 61938 は現在、利用可能なヘッドホンの最低インピーダンスと最高インピーダンスの中間値を取り、ソースインピーダンスを 120Ω に規定しています。したがって、特に何らかの理由で 120Ω でない場合、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」という記述を補完するため、Fig.8 で参照された Headphone1 の周波数特性を、20Ω から 200Ω まで変化するソースインピーダンスと直列に測定した結果を Fig.10 に示します。「None」と表示された曲線は、パワーアンプの内部ソースインピーダンスに追加の抵抗がない場合の測定値です（このとき約 0.1Ω）。このヘッドホンの公称インピーダンスは 63Ω です。

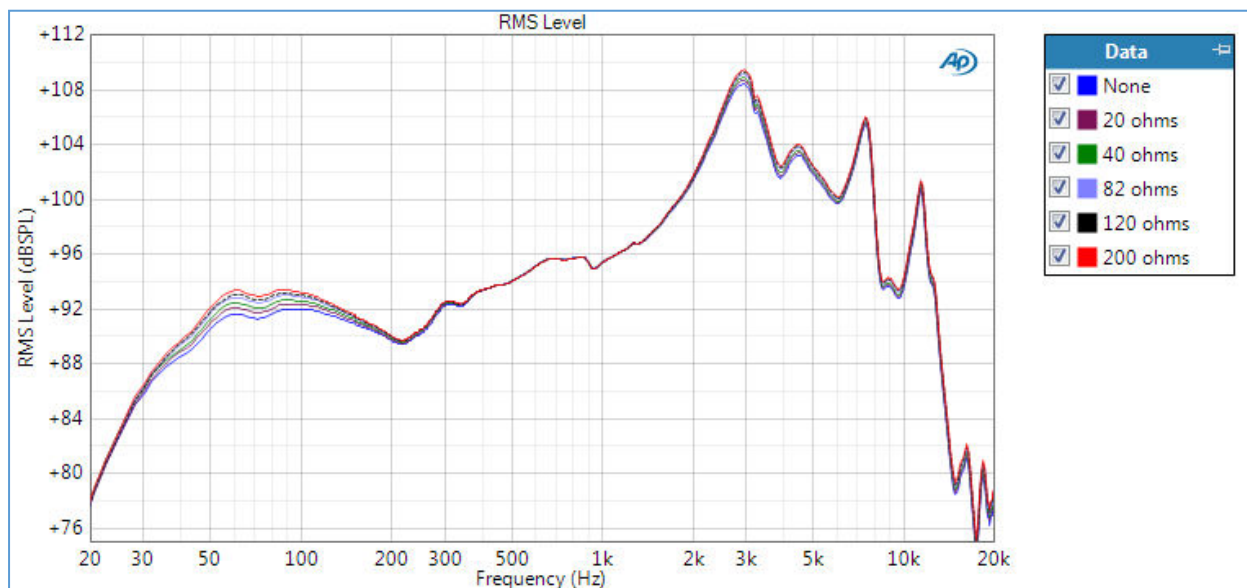


Figure 10. Frequency response of Headphone 1 as measured with various source impedances at the characteristic voltage. The maximum variation of about 1.7 dB between curves occurs at approximately 60 Hz.

ソースインピーダンスに関しては、ヘッドホンの性能に対する影響の有無に関わらず、テストはヘッドホン測定に使用するアンプのソースインピーダンスをチェックして記録するように注意する必要があります。計測用のパワーアンプは、ソースインピーダンスが 0.1Ω 未満であり、私たちが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 0.8Ω でした。この点に関して、AV レシーバは予測が難しく、私たちがテストした最新の「Surround Sound」レシーバのヘッドホンジャックのソースインピーダンスは $1.3k\Omega$ でした。

Standard Measurement Conditions

IEC 60268-7 に規定されている電気音響測定が多くて、測定を行う際にヘッドホンを「*brought under standard conditions for measurement* (標準的な測定条件の下に置くこと)」としています。これらの標準的な測定条件は下記の通りです。

1. メーカーの定格動作条件でイヤー・シミュレータに接続すること
2. 定格ソースインピーダンスと直列に 500 Hz の正弦波電圧が印加され、イヤー・シミュレータで 94 dB SPL の音圧レベルが測定されること。(注：ヘッドホン入力で測定されたこの電圧は、特性電圧とも呼ばれます)。
3. ボリュームコントロールがある場合は、最小レベルで設定すること。プリアンプを使用するヘッドホン及びワイヤレスヘッドホンの場合、メーカーは測定のための基準ゲイン設定を指定すること。
4. バランスコントロールがある場合は、均等になるように設定すること
5. クロストークコントロールがある場合は、最小になるように設定すること
6. ヘッドホンに電源が必要な場合は、定格電圧と周波数を満たすこと。

Ear Simulator Calibration

ATF のイヤール・シミュレータには、DRP の音圧に比例した電圧を発生するマイクが内蔵されています。一般的に、各マイクロホンの感度は、指定された公称値とわずかに異なります。ほとんどの場合、アナライザが圧力単位 (Pa) と dB SPL (20 μ Pa) に対してスケールされた両 Ch の結果を表示するように、ユーザーはこれらの入力をオーディオアナライザで校正する必要があります。これは本来の校正ではなく、V / Pa の各イヤール・シミュレータの感度を対応する入力チャンネルに割り当てる作業です。マイクロホンの感度は、イヤール・シミュレータに付属の校正データシートから読み取ることができますが、サウンドレベルキャリブレータまたはピストンフォンを使用してこれらの値を設定または確認することをお勧めします。これらのデバイスは、イヤール・シミュレータに適切に接続された場合、通常は 250 Hz で 114 dB SPL の正弦波信号を出力します。アダプタを使用して、Fig.11 に示すように、イヤール・シミュレータの外耳道延長部にキャリブレータを取り付けます。

注：イヤール・シミュレータの周波数応答はこの周波数ではまだフラットなので、250 Hz の公称正弦波周波数の音圧レベルのキャリブレータまたはピストンフォンを使用する必要があります。正弦波周波数が 1,000 Hz のキャリブレータを使用するには、イヤール・シミュレータの音響ゲインを補正する必要があります。



Figure 11. Using a CAL250 sound level calibrator to calibrate a test fixture's ear simulator microphone.

The Importance of Fit

頭部または耳介へのヘッドホン／イヤホンの装着（フィッティング）は、性能に大きな影響を及ぼす可能性があります。これは特にクローズドイヤホンの低音特性を低下させます。例として、Fig.11 は Headphone 1 の 5 つの周波数特性の測定値を示しています。このとき、ヘッドホンを ATF から取り外し、各測定の前に再装着しました。フィッティングを考慮したこの変動を考慮するには、いくつかの測定結果（通常 3～5）を平均してヘッドホンを取り外し、測定間で再装着することをお勧めします。

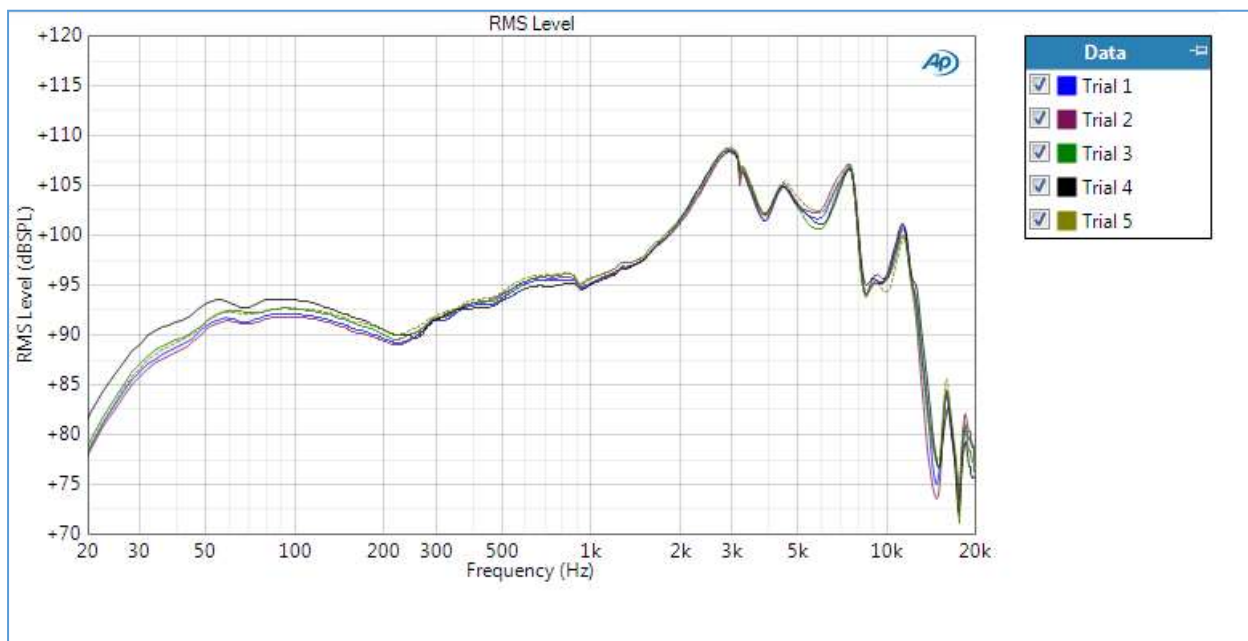


Figure 11. Frequency response of circumaural Headphone 1 for 5 cycles of placing the headphones on the ATF.

インサート型イヤホン（Earphone1 と呼ばれる）の Fig.11 と同様の測定を Fig.12 に示します。この場合、フィッティングによる変動は、おそらく各試行でわずかに異なる挿入深度のために高周波数（6kHz 以上）で顕著であり、閉耳外耳道（closed ear canal）の共振周波数を変化させます。インサート型イヤホンの拡張された低音特性は、外耳道の開口部を完全に密閉していることによる可能性が高いと言えます。

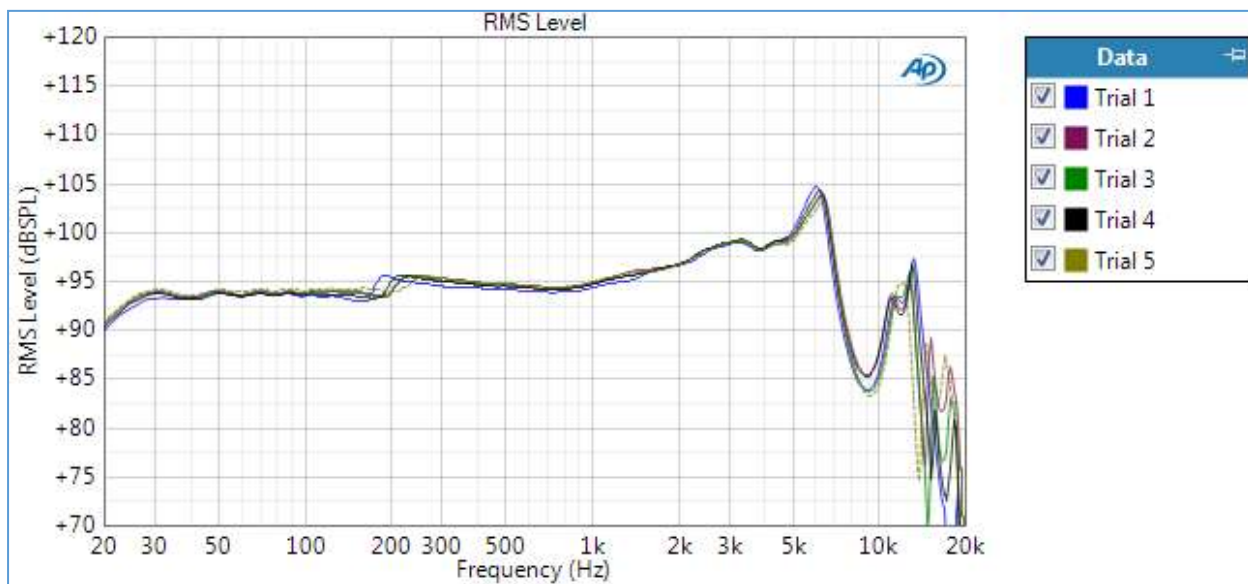


Figure 12. Frequency response of an insert Earphone 1 for 5 cycles of placing the earphone on the ATF.

Left/Right Tracking

IEC 60268-7 には規定されていませんが、Left/Right のトラッキングは、ヘッドホンの各イヤホンの相対的な特性を測定するため、ステレオヘッドホンで有用な方法です。これは、左右の耳からの特性を比較することで、2つの耳シミュレータを使用して ATF の周波数特性測定から容易に算出できます。

完全に一致するイヤホンは、0 dB のフラットである Left/Right のトラッキングレスポンスカーブを持ちます。Fig.13 に示すように、インサート型 Earphone1 の左右のイヤホンは、20Hz から 10kHz で良好に一致しています。

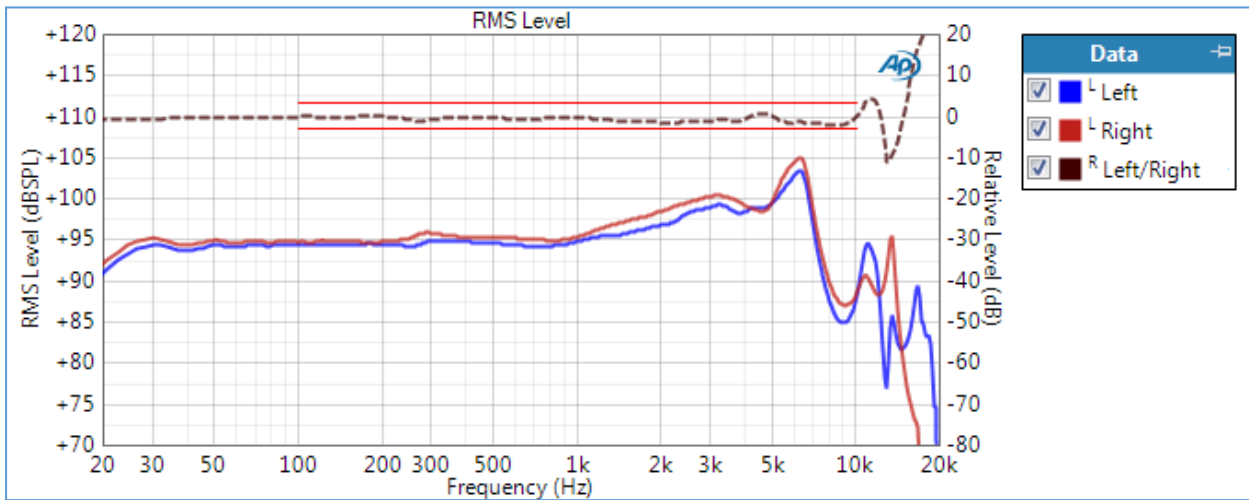


Figure 13. Frequency response of the left and right earphones of Insert Earphone 1 (left axis) and their Left/Right tracking response curve with ± 3 dB limits (right axis).

Crosstalk

Crosstalk Attenuation は IEC 60268-7 の 8.12 項でカバーされていますが、実際には周波数特性測定の特種な種類です。周波数特性と Left/Right のトラッキングと同時に測定するのが最も便利です。Right-Left のクロストークを測定するには、Right チャンネルを駆動せず、Left チャンネルを駆動して左側のイヤークシミュレータの応答を測定するだけです。その後、Right チャンネルを駆動し、Left チャンネルを駆動しないで測定を繰り返します。これら 2 つの曲線の比率が、Right-Left のクロストークです。

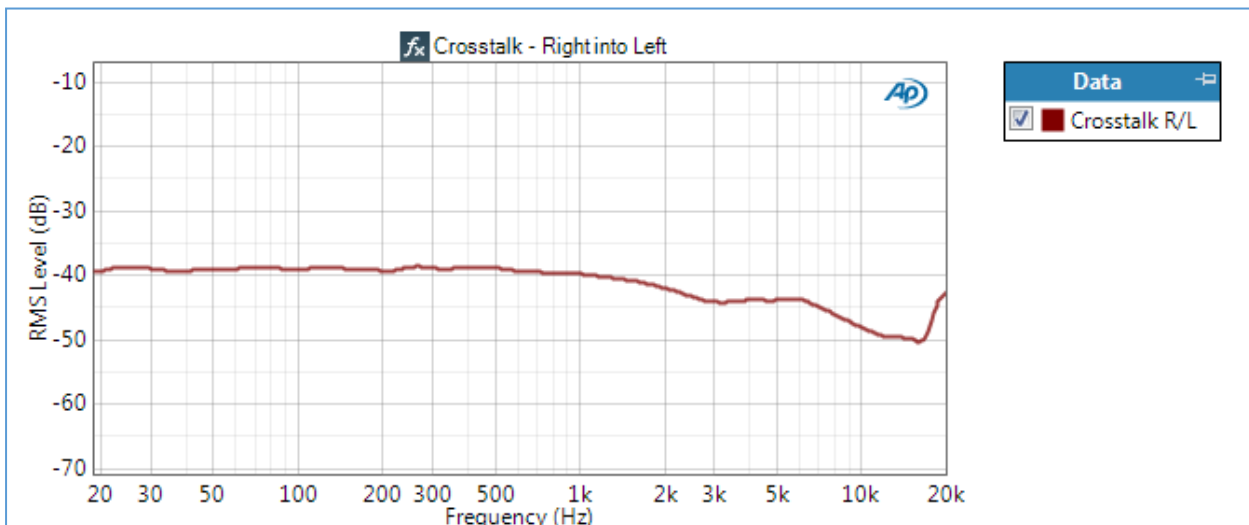


Figure 14. Measured crosstalk (right into left) of insert Earphone 1

Ambient Noise Considerations

音響測定を行う場合、周囲のノイズレベルが低い測定環境は非常に望ましいものです。これは、ひずみ信号成分がテスト信号よりも（理想的に）オアダの低い歪み測定に対して特に当てはまります。

テスト環境の環境ノイズが大きすぎる場合、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ます。

音響測定を行うときは、周囲のノイズを測定することをお勧めします。周波数特性を測定する際の環境ノイズの推定値を得る簡単な方法の1つは、Generator をオフにして測定を行うことです。Fig.15 は、3つの信号レベルのヘッドホンの周波数特性測定値のセットを示しています。1つは特性電圧 V_{ch} (500Hz で 94dB SPL となる電圧) で、1つは $V_{ch} - 6\text{dB}^{10}$ で、1つは Generator をオフにしたものです (Noise と表示)。これらの測定は、従業員のいない一般的なオフィス環境で行われました。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) システムおよび近くのコンピュータ冷却ファンの騒音によるものです。この測定値が比較的高い S/N 比を有するようになりますが、いくつかの周波数でのノイズレベルは、良好な歪み測定のために過度に近くなります。たとえば、580 Hz のノイズピークは、この周波数の下位 (290 Hz、193 Hz、... など) での計算された全高調波ひずみ (THD) 比の推定値に影響します。重要な測定のためには、良好なノイズアイソレーションを有する無響室またはチャンバが必要です。

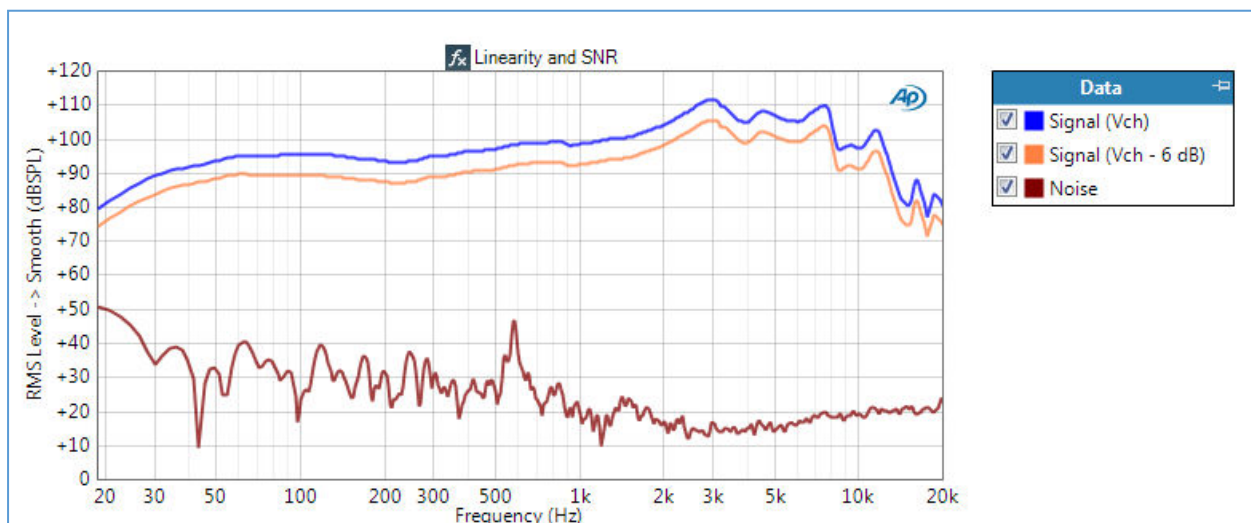


Figure 15. Headphone 1 frequency response measurement at 3 signal levels" V_{ch} , $V_{ch} - 6\text{ dB}$ and no signal.

Electrical Impedance

電氣的インピーダンスは、ヘッドホンにパワーアンプと整合させるために重要です。IEC 60268-7 では、ヘッドホンに定格インピーダンスが求められています。この公称インピーダンスは、マッチングのためにメーカーによって指定された純抵抗値です。この規格では、定格周波数範囲内の任意の周波数において、ヘッドホンの測定されたインピーダンスの大きさ-周波数カーブが定格値の 80% を超えてはならないことが要求されています。

インピーダンスを導出するには、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。一般的に、20Hz から 20kHz まで対数的にスイープされた正弦波信号が使用されます。電流の測定には一般的に「検出抵抗」が使用されます。これは、ヘッドホンと直列に配置された小さな (例えば 1.0Ω または 0.1Ω の) 高精度抵抗で、検出抵抗両端の電圧降下は、電流を計算するために使用されます。

¹⁰ $V_{ch} - 6\text{ dB}$ での測定は、後で被測定物 (DUT) の線形性を評価するために使用されます。

インピーダンスは、ヘッドホンが線形領域で動作することを保証するのに十分低い一定の駆動レベルで測定する必要があり、数デシベル離れた2つのレベルで音響周波数特性を測定することによって測定することができます。例えば、Fig.15の曲線 V_{ch} と $V_{ch}-6dB$ は、dB SPL（それらの比は Pa）の差を取って比較し、結果の比較曲線を1kHzに正規化します。この結果をFig.16に示します。システムが完全な線形性を有するとき、結果は0dBのフラットになります。

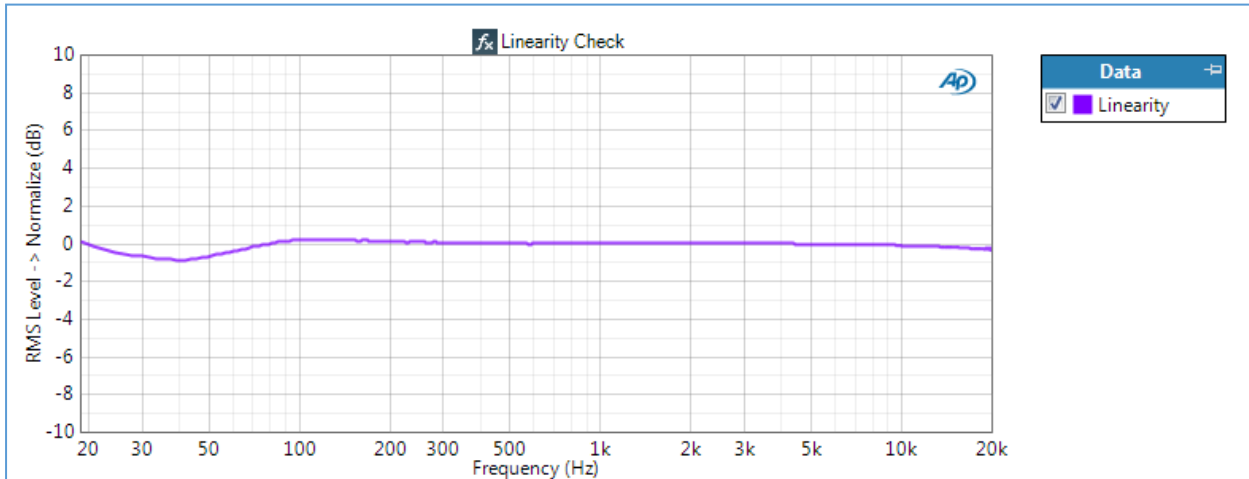


Figure 16. Linearity check— the Level responses of Headphone 1 at two drive levels 6 dB apart are compared in the frequency domain.

電圧と電流は、大きさと位相（または実数部と虚数部）の両方を持つ位相ベクトルまたは複素数なので、インピーダンスも同じです。しかし、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を考慮します。Fig.17は、ヘッドホンの公称定格インピーダンスの63Ωの80%の値を示す線で、Headphone1の測定インピーダンス曲線を示しています（Fig1, Fig8を参照）。インピーダンス測定は、標準的な測定条件を必要とする IEC 60268-7 の測定の1つで、ATFで測定を実施する必要があります。Fig.17のFree air測定は、測定されたインピーダンスの大きさの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。

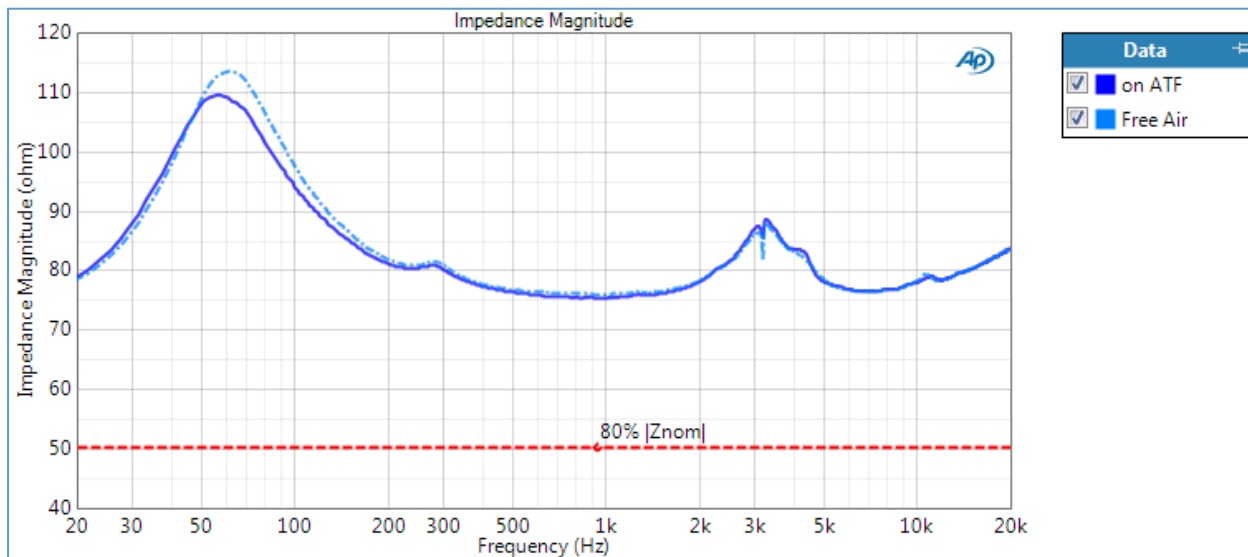


Figure 17. Impedance magnitude curves measured on an ATF and in free air for Headphone 1 (introduced in Figure 8). The horizontal dashed line indicates the value at 80% of the nominal impedance.

Input Voltages

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です。

The Program Simulation Signal

IEC 60268-7 には、ヘッドホン用のいくつかの入力特性電圧が規定されています。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殊なノイズ信号をベースにしています。Fig18 に示すゲイン応答を持つ特別なバンドパスフィルタでピンクノイズをフィルタリングすることによって信号が生成されます。これは、プログラムの音源（音楽とスピーチ）の長期平均スペクトルの代表的なものです。また規格の第 7 部には、1.8 から 2.2_{11} の範囲内の特定のクレストファクタを持つ信号が要求されています。

¹¹ プログラムシミュレーション信号の両方のバリエーションは、Audio Precision APx500 シリーズオーディオアナライザの標準波形タイプとして利用できます。

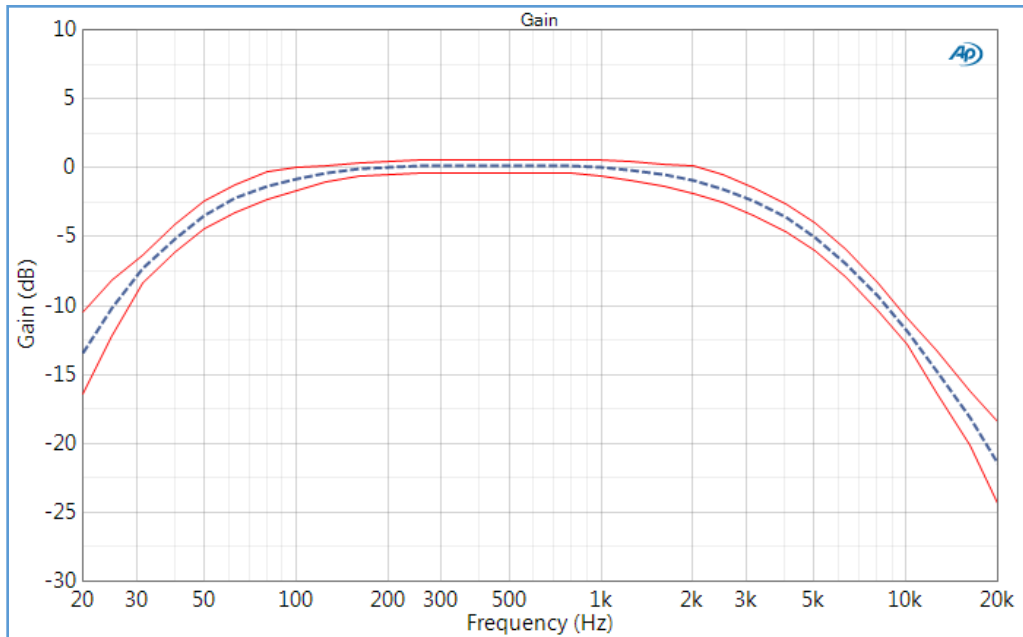


Figure 18. Power spectrum of the Program Simulation Noise signal per IEC 60268-1 (blue) with limits (red).

IEC 60268-7 に規定されている入力電圧特性は次のとおりです。

1. 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、メーカーが規定する最大実効電圧
2. Rated long-term maximum source e.m.f.: ヘッドホンが損傷なしに許容できる最大電圧を 1 分間印加した後に 2 分間の休止を 10 サイクル、クレストファクタを制限したプログラムシミュレーション信号
3. Rated maximum permanent noise source e.m.f.: 上記 2 と同様に、信号を 100 時間印加したもの
4. Characteristic voltage: 定格ソースインピーダンスを介して印加される 500Hz 正弦波信号が、イヤール・シミュレータで 94dB SPL の音圧レベルを生成する電圧.
5. Simulated program signal characteristic voltage: 定格ソースインピーダンスを介して印加されるプログラムシミュレーション信号が、イヤール・シミュレータで 94dB SPL の音圧レベルを生成する電圧
6. Simulated program signal characteristic voltage corrected by A-weighting and free-field response compensation: 上記 5 と同様に、イヤール・シミュレータで測定される信号が A ウェイト処理と自由音場補正したもの

これらの入力電圧特性は、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の有無にかかわらず）、Generator を指定されたレベルに調整する機能、長時間 rms レベルの測定、周波数ウェイトフィルタ、イヤール・シミュレータで測定された特性を自由音場に補正する機能（Input EQ）などの機能を含むオーディオアナライザで簡単に測定できます。

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

Sound Pressure Level

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

1. Maximum SPL: ヘッドホンが定格ソースインピーダンスと直列のソース e.m.f で 500 Hz の正弦波電圧で駆動されたときに、イヤール・シミュレータで生成される音圧レベル
2. Working SPL: ヘッドホンが公称定格インピーダンスに 1mW に相当するレベルで定格ソースインピーダンスと直列に 500Hz の正弦波電圧で駆動されたときに、イヤール・シミュレータで生成される音圧レベル
3. Simulated program signal working SPL: 上記 2 と同様に、正弦波の代わりにプログラムシミュレーション信号を使用したもの
4. Simulated program signal working SPL corrected by A-weighting and free-field response compensation: 上記 3 と同様に、イヤール・シミュレータで測定された音圧レベルを A ウェイト処理と自由音場補正したもの

Fig.8 で紹介した Headphone1 の公称インピーダンスは 63Ω で、この負荷の 1mW に相当する電圧は 251mV です。このヘッドホンは、測定された作動音圧レベルが 94.9dB SPL で、このとき、特性電圧 (226mV) での入力電力は 1mW に非常に近い値になりました。

オーディオアナライザを使用すると SPL をシミュレートしたプログラム信号を簡単に生成できます。イヤール・シミュレータ (上記 3) で直接測定された場合、ヘッドホンへの入力電圧は比較的長い時間 (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、目標レベル 1mW に必要な Generator レベルを調整することができます。目標レベルに達すると、アナライザを使用してイヤール・シミュレータの実効レベルを測定することができます。A ウェイト処理および自由音場補正の場合、A ウェイトフィルタと、DRP HRTF の自由フィールドの逆数に対応する EQ 曲線 (Fig.2) が入力に設定されている点を除いて手順は同じです。Headphone1 については、SPL を動作させるシミュレーションされたプログラム信号が 99.7dB SPL で測定され、A ウェイト処理および自由音場補正 SPL が 89.7dBA で測定されました。

Fig.19 は、プログラムシミュレーションノイズ信号で駆動されるヘッドホン 1 の ATF のイヤール・シ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。ウェイト処理されていないもの (DRP)、自由音場補正されたもの、自由音場補正と A ウェイト処理で補正された 3 つのスペクトルが示されています。ウェイト処理されていない曲線は、テスト信号が広帯域ノイズであるため、自由音場 HRTF と類似しています。

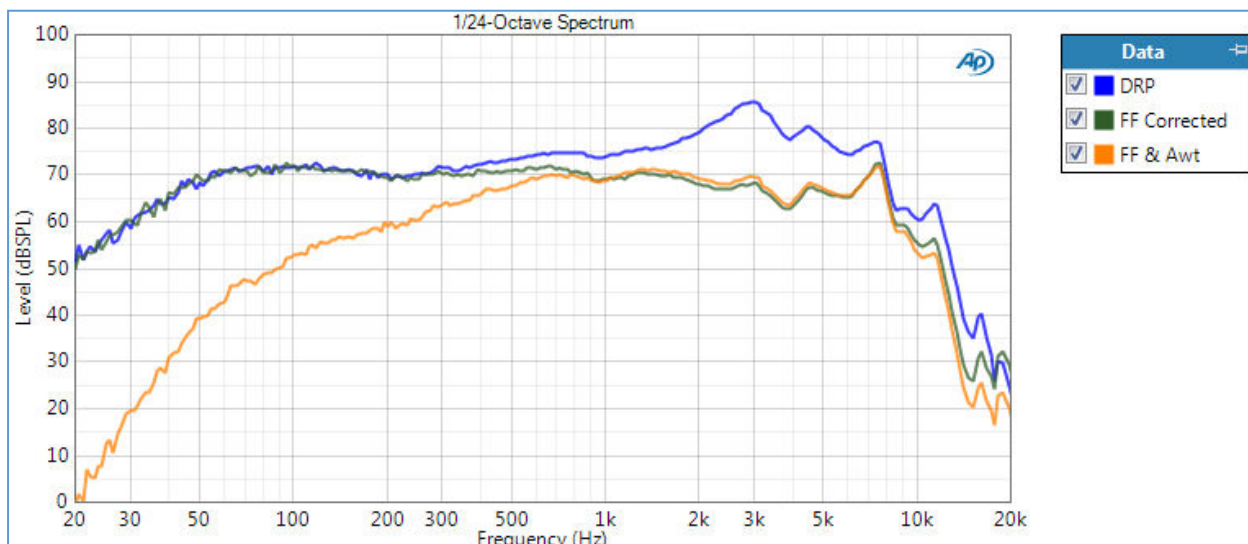


Figure 19. 1/24th octave spectra of the subject headphone when driven with the IEC 60268-1 program simulation signal at 1 mW—(a) as measured at the Drum Reference Point, (b) corrected to the free field, and (c) free field corrected and A-weighted.

関連するヨーロッパ規格 (BS EN50332) では、騒音による聴力損失を制限する目的で、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。[14], [15]

Distortion

IEC 60268-7 では 8.7 Amplitude Non-linearity で歪みについて説明しています。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。

Harmonic Distortion

前述したように、周波数特性を測定する正弦波チャープ法の利点の 1 つは、高調波歪みを音響特性で同時に測定できることです。IEC 60268-7 では、2 次および 3 次の高調波ひずみのみを特定して測定する必要があります。Fig.20 に、Fig.12 で導入されたインサート型 Earphone1 のレベルおよび歪みプロットを示します。このプロットは、第 2 および第 3 高調波 (H2 および H3) の歪みのレベルと全高調波歪みを示します。全高調波歪みレベルは、約 20Hz から 3kHz までの基本信号レベルより約 40dB 低く、THD Ratio は-40dB または約 1%になります (Fig.21)。

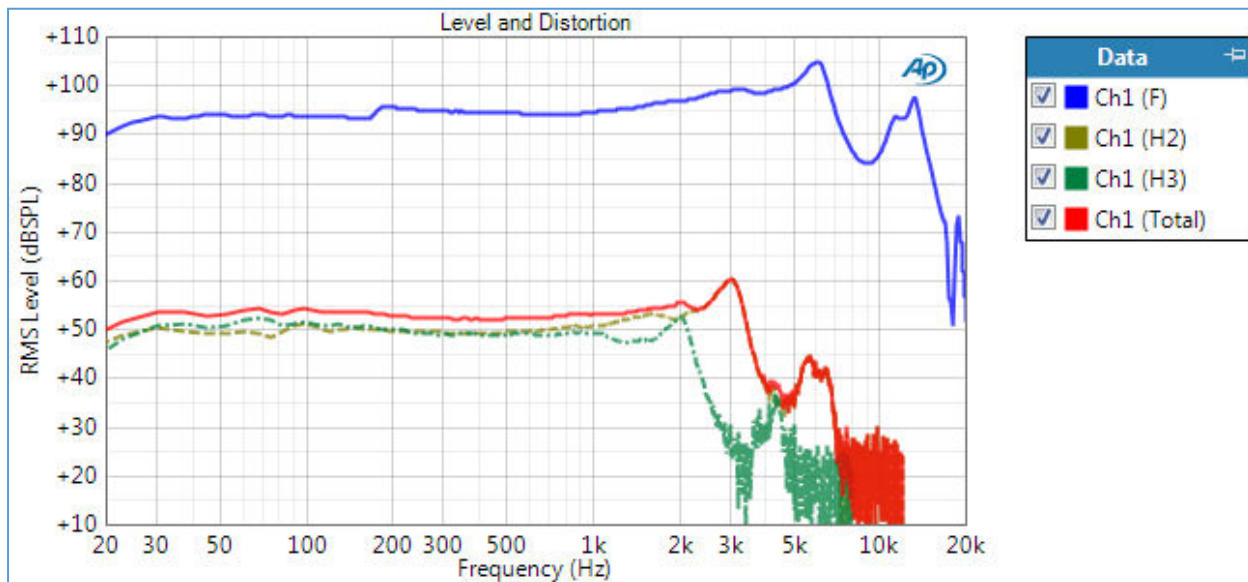


Figure 20. Level and distortion plot for insert Earphone 1 tested at the characteristic voltage of an ATF with pinna and ear canal extension.

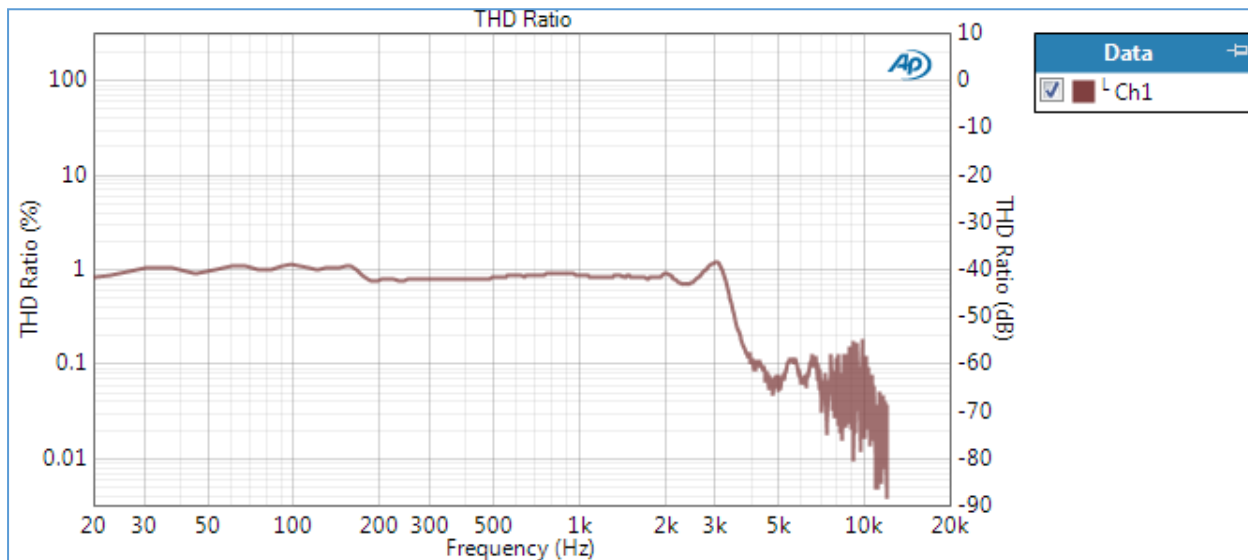


Figure 21. Total Harmonic Distortion Ratio response of insert Earphone 1 from the same measurement as Figure 20.

Modulation Distortion

IEC60268-7 の Section 8.7.3 Modulation Distortion では、相互変調歪の 2 つのタイプの 1 つが指定されています。このとき、指定された特性は、信号の振幅比が 4 : 1 の 2 つの正弦波（1 つは 70 Hz、もう 1 つは 600 Hz）で構成された 2 次と 3 次の相互変調歪み比です。2 つの正弦波の信号レベルは、定格入力電圧に対してそれぞれ -1.9 dB および -4.0 dB でなければなりません。二次変調歪み比は、530Hz と 670Hz の二次 IMD の積の和から算出され、600Hz 正弦成分のレベルに対する比として表されます。3 次変調歪は同様に 460Hz と 740Hz の 3 次の積から計算されます。

Fig.22 は、要求された信号で駆動されたインサート型 Earphone1 の FFT スペクトルを示しています。分かりやすくするために、スペクトルは、600Hz の正弦成分のレベルに対して dB 単位でプロットされています。この測定で、2 次および 3 次の変調歪み比は、それぞれ -36.3 および -32.1 dB でした。

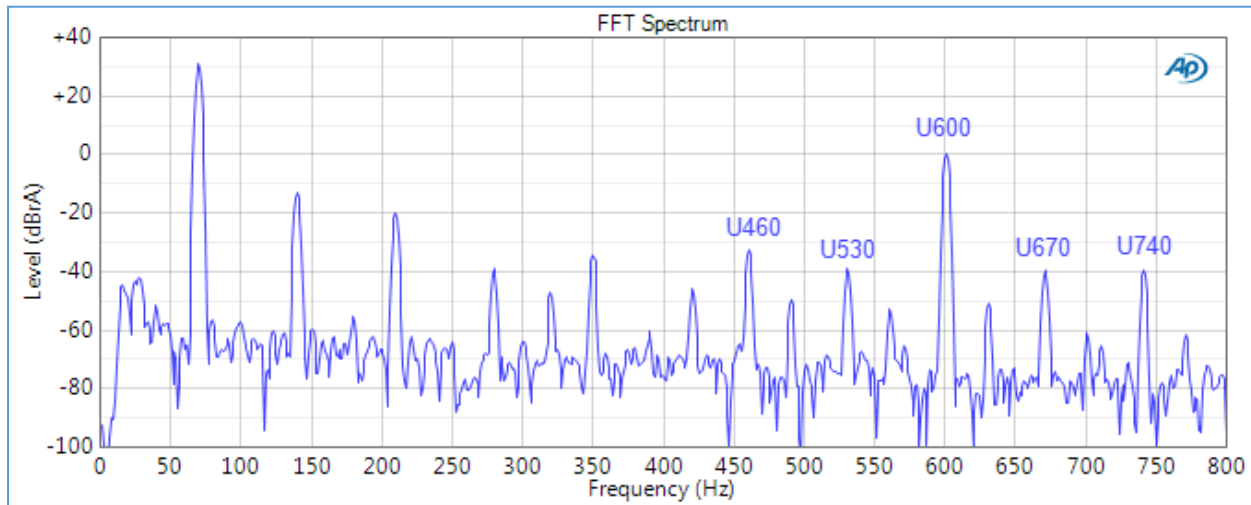


Figure 22. FFT spectrum of insert Earphone 1 subjected to the Modulation distortion signal at 70 Hz and 600 Hz. Second and third order intermodulation distortion components are also noted.

Difference Frequency Distortion

Difference Frequency Distortion (DFD)は IEC60268-7 で規定された第 2 種の相互変調歪みです。この測定では、周波数が 80Hz で分離された 2 つの正弦波信号を使用し、それぞれが定格入力電圧の半分を持ちます。歪みの積は、全体の信号レベルの比として表されます。正弦波周波数をスイープして DFD スペクトルを作成することができます。Fig.23 は、平均周波数を 250Hz から 20kHz に掃引した DFD スペクトルを表しています。

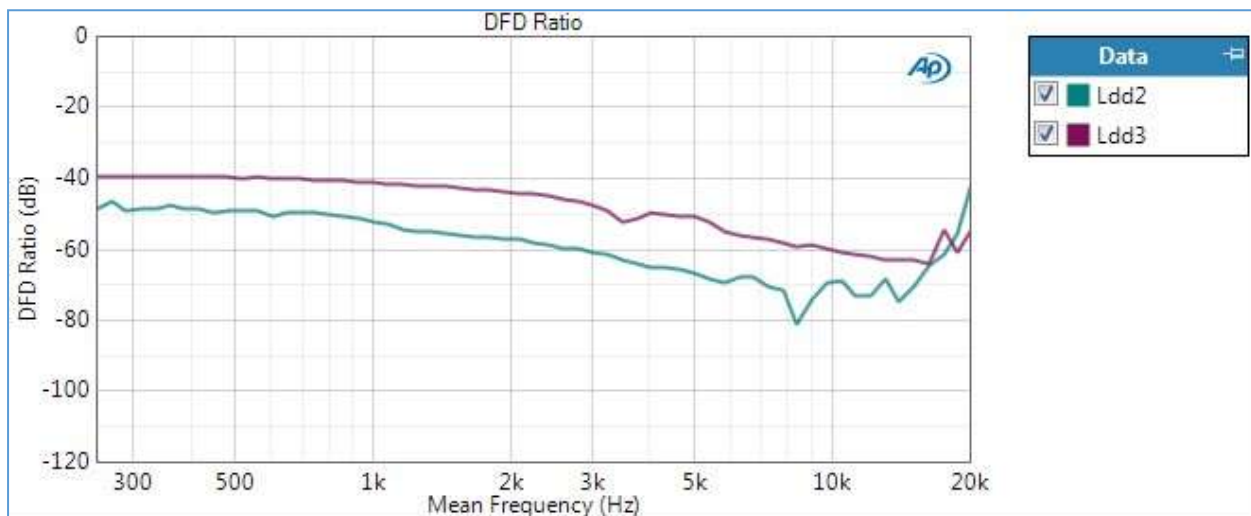


Figure 23. Difference Frequency Distortion sweep of insert Earphone 1. Ldd2 and Ldd3 are the 2nd and 3rd order distortion products, respectively.

IMD 測定は、テスト信号の周波数よりも低い周波数で生じる歪みの積があるため、帯域幅が制限されたシステムで特に有用です。このようなシステムでは、基本信号の周波数が増加すると、高調波歪み成分が測定帯域幅をすぐに超えます。

Rub and Buzz Distortion

Rub and buzz は歪みの一種であり、IEC 60268-7 では対応していませんが、ヘッドホンメーカーにとっては、特に製品テストの測定として重要です。従来の歪み測定の方法では、Rub and buzz の不良を検出することは難しい場合があります。

Audio Precision APx500 オーディオアナライザには、正弦波チャープ周波数特性測定と連動するオプションの Rub and buzz 検出アルゴリズムがあり、Rub and buzz が本質的に「とげ状」の（すなわち、クレストファクタが高い）高い周波数の信号を生じるという事実に基づいています。使用する基準の 1 つは、Rub and Buzz クレストファクタです。基本周波数よりも通常 10～20 倍高い周波数でハイパスフィルタリングした後の信号のクレストファクタを計算することによって導出されます。このアルゴリズムは、既知の良好な特性を持つデバイスに基づいてリミットを設定することによって、改良することができます。しかしこれまでの経験から、欠陥のないドライバは、Rub and Buzz クレストファクタが一般的に約 13dB より低くなることが分かっています。

Fig.24 に、Bluetooth ノイズキャンセリングヘッドホンの Rub and Buzz クレストファクタを示します。図示されているように、Left イヤホンは、約 25Hz～125Hz の周波数範囲においてクレストファクタが 13dB を大きく超えていました。このテストを実施する前に音楽を聴いた際は、これらのヘッドホンに問題は見られませんでした。しかし、その後、25Hz から 125Hz の範囲の正弦波信号で駆動されたとき、Left イヤホンでは Buzz の欠陥がはっきりと聞こえるようになりました。

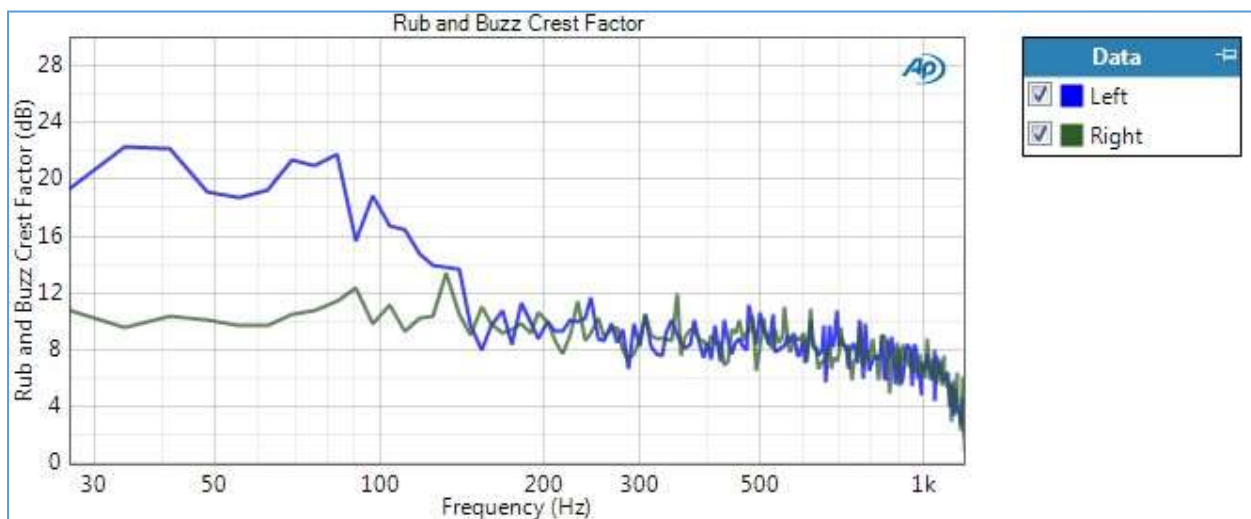


Figure 24. Rub and Buzz Crest Factor measured on a pair of noise canceling Bluetooth headphones. The Left earphone had a very audible buzz when driven with a sine signal in the frequency range from 25 to 125 Hz.

Sound Attenuation

Sound Attenuation は、ヘッドホンまたはイヤホンが、周囲の騒音が外耳道に侵入するのをどれくらい遮断しているかを測定します。これは、アクティブノイズキャンセリング（ANC）機能を装備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、イヤープロテクタの標準である ISO 4869-1 [16]に従って Sound Attenuation 測定を行うことを規定しています。

ISO 4869-1 は、イヤープロテクタの有無にかかわらず、16 人の被験者の聴力しきい値を測定することに基づく、主観的な測定方法です。ヘッドホンの音の減衰を測定する最も正確な方法ではありませんが、このような測定は難しく時間がかかります。ANC ヘッドホンにより適した方法は、ISO 4869-3 [17-19]と ATF を使用することです。

ISO 規格 4869-3 は、ATF の周りにランダム入射音場または平面進行波音場のいずれかを作成する必要があります。これには音場が要件に準拠していることを検証するために、各タイプの音場および測定に関する詳細な要件が必要です。ピンクノイズなどの広帯域信号が生成され、ATF のイヤークシミュレータ¹²の音量が 1/3 オクターブのバンドで測定されます。

ANCの付いていないヘッドホンでは、まずのオープンイヤー（ヘッドホンを外した）状態の1/3オクターブ音量スペクトラムを測定し、その後ヘッドホンを装着して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付きヘッドホンでは、これに加えてANC機能を有効または無効にした測定を行い、パッシブおよびアクティブな減衰値を計算します。Fig.25に示すように、測定されたスペクトルは、通常、測定されたオープンイヤースペクトルに対して正規化されます。このグラフは、アクティブノイズキャンセリングが約1.5kHz以下で有効であり、約1.5kHzから4kHzまでの周波数範囲においてパッシブのみよりも有効でないことを示しています。

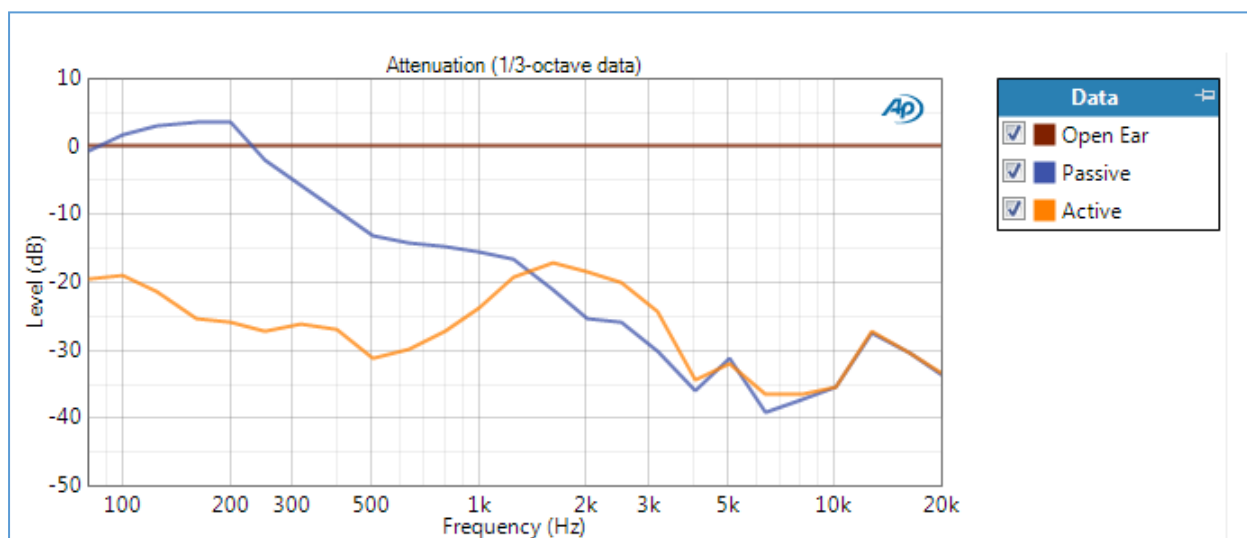


Figure 25. Normalized spectra from one measurement of an ANC headphone showing passive and active attenuation.

¹² ISO 4869-3 はヘッドホンの挿入損失を測定するだけなので、耳穴式イヤー・シミュレータは不要です。ただし、イヤー・シミュレータを搭載した ATF もこの目的に使用できます。

References

1. IEC 60268-7:2010 — Sound system equipment, Part 7: Headphones and earphones, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
2. IEEE 269:2010 — Standard Methods for Measuring Transmission Performance of Analog and Digital Telephone Sets, Handsets, and Headsets, IEEE Communications Society, NY.
3. IEEE 1652:2008 — Application of Free Field Acoustic Reference to Telephony Measurements.
4. Toole, Floyd (2009). Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms. Taylor and Francis.
5. Struck, C.J. (2013) Free Plus Diffuse Sound Field Target Earphone Response Derived From Classical Room Acoustics Theory. AES Convention Paper 8993.
6. ITU-T P.58:2013. Head and torso simulator for telephonometry. International Telecommunications Union.
7. ITU-T P.57: 2009. Artificial ears. International Telecommunications Union.
8. Lorho, Gaetan (2009) Subjective Evaluation of Headphone Target Frequency Responses. AES Convention Paper 7770.
9. ITU-R BS.708 (1990) Determination of the electro-acoustical properties of studio monitor headphones. International Telecommunications Union.
10. Olive, Sean & Welti, Todd (2015) Factors that Influence Listeners' Preferred Bass and Treble Balance in Headphones. AES Convention Paper 9382.
11. A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept sine technique," Presented at the 108th AES Convention, Paris, France, 2000.
12. IEC 60268-1:1985 — Sound system equipment, Part 1: General
13. Snaidero, T., Jacobsen, F., & Buchholz, J. (2011). Measuring HRTFs of Bruel & Kjaer Type 4128-C, G.R.A.S. KEMAR Type 45BM, and Head Acoustics HMS II.3 Head and Torso Simulators. Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering.
14. BS EN 50332-1:2013. Sound system equipment: Headphones and earphones associated with personal music players. Maximum sound pressure level measurement methodology. General method for "one package equipment."
15. Begin, J. (2012). Measuring the Sound Pressure Level of Portable Audio Player Headphones. Audio Precision Technote 107.
16. ISO 4869-1 (1990). Acoustics - Hearing protectors - Part 1: Subjective method for the measurement of sound attenuation.
17. ISO 4869-3 (2007). Acoustics - Hearing protectors - Part 3: Measurement of insertion loss of ear-muff type protectors using an acoustic test fixture.
18. Cui, J., Behar, A., Wong, W. & Kunov, H. (2003) Insertion loss testing of active noise reduction headsets using acoustic fixture. Applied Acoustics 64 (2003) 1011–1031
19. Wulf-Andersen, P. (2013) A practical guide to measure on Hearing Protection Devices and Noise Cancelling Headsets using Acoustic Test Fixtures. International Symposium on ElectroAcoustic Technologies, China.
20. IEC60318-4: Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts