

## APx500オーディオアナライザを使った伝達関数測定

### はじめに

ここでは、APx500ソフトウェア (Ver5.0以降で有効) を使った伝達関数測定を説明します。まず、伝達関数測定一般的な情報を説明後、いくつかの難しいオーディオテスト測定 (例、スマートスピーカーやデジタルマイク (PDMやBluetooth)) を説明していきます。伝達関数分析の重要なポイントとなる一つは、音声や音楽等の広帯域信号を利用して、デバイスの周波数応答を測定する環境を作ることです。これは、音声通信に利用するデバイス (スマートスピーカーやスマートフォンやヘッドセットマイク等) の分析に最適です。これらは音声信号が必要とするDSPアルゴリズムを組み込んでおり、一部はサイン波信号を完全にブロックするように設計されています。伝達関数解析は、このようなデバイスの周波数応答測定を大幅に簡素化する手段として利用できます。

### 伝達関数の背景

伝達関数とは、時変刺激に対するシステムの応答を特長づけることを目的にしています。(図1) 入力信号 $x(t)$ に対して出力信号 $y(t)$ を測定します。一般的には、任意の物理デバイスや数学的なシステムをテスト、分析する際に利用します。ただし、オーディオや電気音響テストのアプリケーションスペースでは、テスト対象のシステムまたはDUTは、電子回路、オーディオデバイス、フィルター、スピーカー、マイクに該当します。

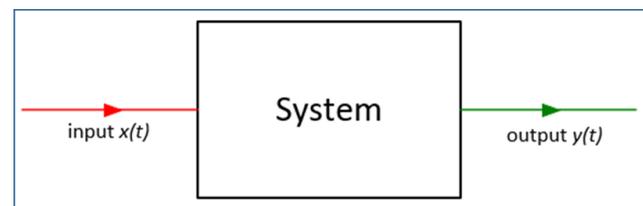


図1. システムのブロック

オーディオエンジニアとして、周波数領域でシステムを特長づけることは非常に関心の高いところです。例えば、音質の古典的で基本的な尺度は、デバイスの周波数応答であり、入力あたりの出力 (ゲイン) を周波数の関数として表します。フーリエ変換と呼ばれる数学的手法だと、時間領域よりも周波数領域でシステムを特長づけるのが容易にできます。図2は、フーリエ変換 (F) を利用して、信号とシステム応答を変換する方法を示しています。時間領域から周波数領域へ、逆方向に機能する逆変換フーリエ変換もあります。

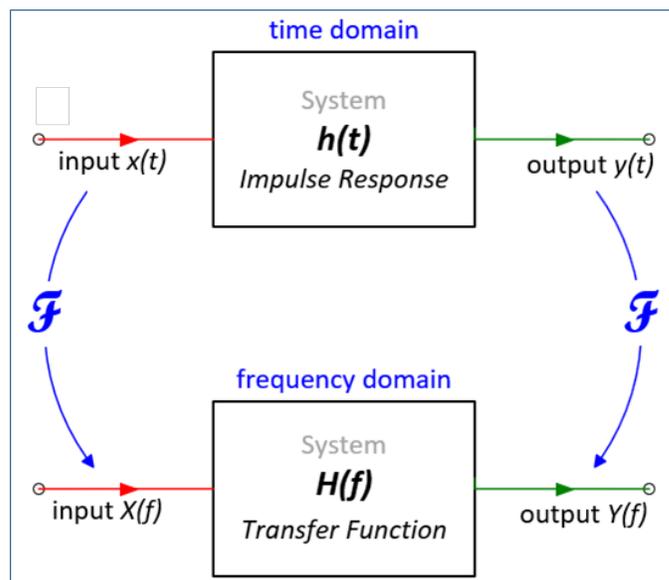


図2. 時間周波数ドメインによるシステム応答図

図2のように、周波数領域のシステム応答は伝達関数として $H(f)$ で表しています。周波数応答関数（FRF）は伝達関数と同じ意味で使われることがあります。伝達関数は複雑です。振幅と位相の両方を兼ね備えています。その大きさを入力あたりのシステムの出力（ゲイン）を周波数の関数として表し、位相応答は出力と入力の位相を周波数の関数として表します。伝達関数は複素量として、大きさと位相の代わりに実部と虚部として表すことができます。伝達関数を利用して、時間両機のシステムの応答を表すインパルス応答を導くこともできます。

## 伝達関数解析

Audio Precisionでは、伝達関数アナライザという言葉で複雑な離散振フーリエ変換によって、システム伝達関数を測定できることを指します。ダイナミック信号アナライザ及び、デュアルチャンネルFFTアナライザを含んだテスト及び測定業界で利用されるより、多くの頻度で利用致します。伝達関数測定のブロック図を図3に示します。ほとんどのアナライザは測定は次のように機能します。

- 広帯域信号が生成され、刺激としてシステム入力に適用されます。ブロードバンド信号は対象の周波数範囲の全ての周波数でエネルギーを含む信号です。適切な信号には、ノイズ、音楽、スピーチ、連続掃引サイン波（チャープ）などが含まれます。シングルトーンやマルチトーンなどの離散サイン波信号は適していません。
- ジェネレーターからの刺激信号はループバックされ、アナライザ入力チャンネルの1つとして測定されます。
- システム出力は、2番目の入力チャンネルで取得されます。（マルチチャンネルアナライザでは、追加のDUT出力チャンネルを取得して分析できます。）
- アナライザはシステムの入力信号と出力信号を同じサンプルクロックで同時に取得し、システムの伝達関数を計算します。

APx500伝達関数測定の追加機能は、多くのアプリケーションで刺激信号をアナライザ入力チャンネルの一つとして取得する必要がないことです。

APxアナライザでは、アナログ入力システムと出力システムが正確に調整されており、アナログとデジタルの両方の10システムが1つのサンプリング期間内で時間調整されているからです。多くの場合、ジェネレーターやディスク上のオーディオファイルにロードされた信号はリファレンスとして利用できます。これにより、測定用に一つのアナライザ入力チャンネルが解放されます。またオープンループ構成でテストする必要があるスマートデバイス、タブレット、メディアプレーヤーのテストに役立つ機能です。

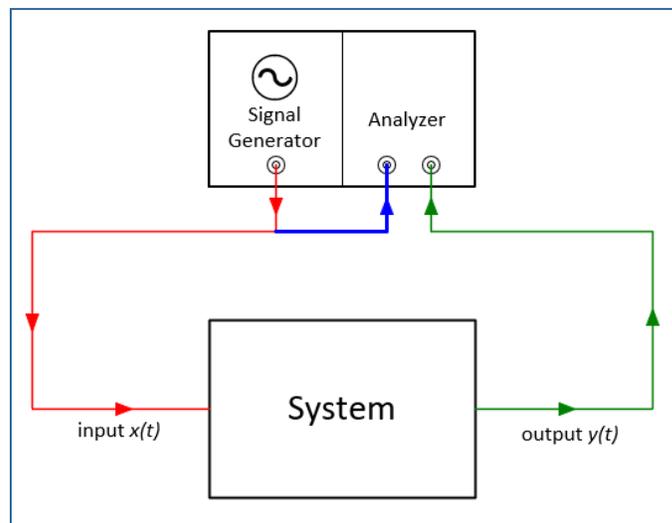


図3. 伝達関数測定のブロック図

## 伝達関数の詳細

APx伝達関数測定を適用するには、伝達関数を導き出す条件、方法等基本的な理解が必要になります。

### 定義

入力信号 $x(t)$ と出力信号 $y(t)$ をもつ図のシステムを例にとつて考えます。

**Cross Spectrum  $G_{xy}$**  は周波数の関数として、 $x$ と $y$ （位相を含む）を想定します。 $G_{xy}$ は大きさや位相が絡まり、複雑です。

Auto Spectrum  $G_{xx}$ や $G_{yy}$ は、周波数の関数として信号 $x(t)$ や $y(t)$ のパワー（レベルの2乗）を表します。オートスペクトラムはパワースペクトラムとも呼ばれます。 $G_{xx}$ と $G_{yy}$ は複雑ではありません。

### 計算モード

APx伝達関数測定はH1,H2マグニチュードの3つの計算モードがあります。これらは伝達関数の計算方法を指定します。

H1モードでは、伝達関数は式(1)の通り、出力と入力間のクロススペクトルを入力のアートスペクトラムで除算していますこれにより、システム出力で発生するノイズの影響を最小限に抑えます。

$$H1: H_{xy} = \frac{G_{xy}}{G_{xx}} \quad (1)$$

H2モードでは、伝達関数は出力のアートスペクトラムを出力と入力間のクロススペクトラムで除算しています。(式(2)) これにより、システム出力で発生するノイズの影響が最小限に抑えられます

$$H2: H_{xy} = \frac{G_{yy}}{G_{xy}} \quad (2)$$

注：オーディオアプリケーションでは、H1モードがH2よりも適切です。これは、入力信号が高精度信号発生器からのものであり、DUT出力信号よりも信号対雑音比が高くなる可能性があります。

マグニチュードのみのモードでは、伝達関数のマグニチュードは、出力スペクトルのマグニチュードを入力スペクトルのマグニチュードで除算します。(式(3)) この場合、位相は利用できません。このモードは、入力信号と出力信号に同期されていないサンプルクロックがある場合に便利です。(例、Bluetoothデバイスのテスト)

$$\text{Magnitude Only: } |H_{xy}| = \sqrt{\frac{G_{yy}}{G_{xx}}} \quad (3)$$

## コヒーレンス関数

H1やH2のモードを利用する利点は、コヒーレンス関数  $C_2$  で計算できます。(式(4))

$$C^2 = \frac{|G_{xy}|^2}{G_{xx}G_{yy}} \quad (4)$$

コヒーレンスは測定品質の指標です。コヒーレンス関数は各周波数での出力  $Y(f)$  と入力  $X(f)$  の間にコヒーレンスまたは因果関係がある度合いを示します。値は、0 (関係なし) と 1 (完全関係あり) の間で変化します。低コヒーレンスは、多くの場合、コヒーレンス関数は全ての周波数 1 と評価されます。

コヒーレンス関数を有効にするにはある程度の平均化を使用する必要があります。平均数が 1 に設定されている場合、コヒーレンス関数は全ての周波数で 1 と評価されます。

## 測定例

伝達関数測定の最初の例として、図4のグラフで考えます。音響テストボックス(100Hzから10kHzの周波数範囲の音声測定用の単一ドライバーのスピーカーの測定結果を示しています。この場合、入力信号はスピーカーに加えられたピンクノイズ信号の電圧であり、出力信号はボックス内のテスト位置で測定されたPa単位の音圧です。図4はマグニチュード応答(H1やH2モードを利用して測定)、位相応答、コヒーレンスを示しています。

- FRFマグニチュード(下のグラフ)の単位はPa/Vrmsです。これは周波数の関数としてのスピーカーのゲインまたは感度になります。例えば、1-2kHzの場合、ドライバーの感度は1Vあたり1Pa(94dB SPL)です。
- コヒーレンス(上のグラフ)は、30Hz-16kHzの全ての周波数で1に近く、この範囲内で測定品質が良好であることを示しています。

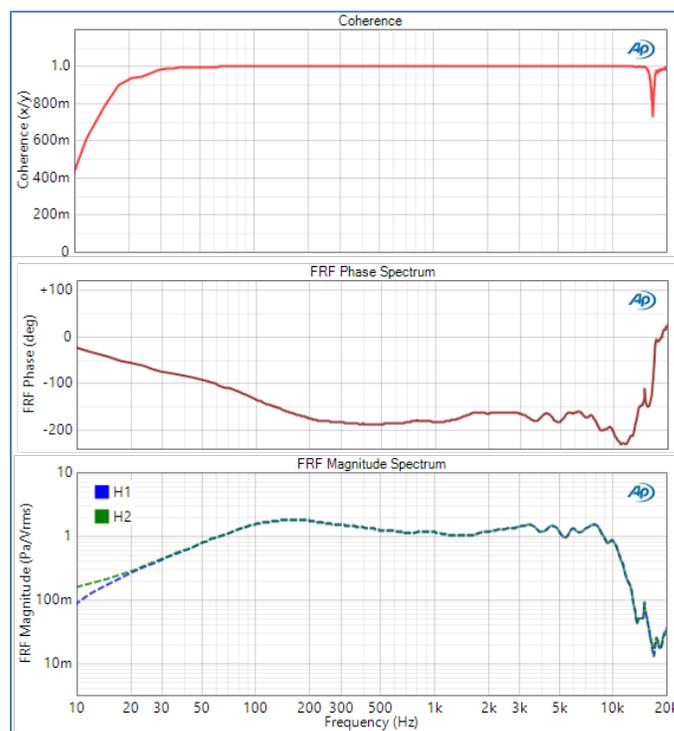


図4. 伝達関数のコヒーレンス、位相、マグニチュードの状態(音響テストボックス内のスピーカーを測定)

- コヒーレンスは30Hz以下は著しく低い値です。これはドライバーからの低出力や、非常に高いノイズレベルや、長時間測定等を含んだ低い周波数での音響測定の際の複合要素によるものです。

- コヒーレンスが 16 to 18 kHzの間で落ちているのは、当該範囲でのドライバーのノッチによるものです。
- H1 とH2計算モードの違いは低周波数と、16 to 18 kHzの周波数以外は特に大きな違いは見られません。

## APx500ソフトウェア実装

バージョン5.0以降では、シーケンスモードの中の伝達関数モードで測定できます。いくつかの測定例を示す前に、ジェネレーターとアナライザーの設定方法に関して説明します。

### ジェネレーターの設定

伝達関数測定のジェネレーター設定に関して図5に示しています。Waveform を利用して、内蔵のノイズ信号を選択するか、刺激として利用する信号を含む .wavファイルを読み込むことができます。ノイズを選択すると、Noise Shapeでホワイトノイズまたはピンクノイズを選択できます。

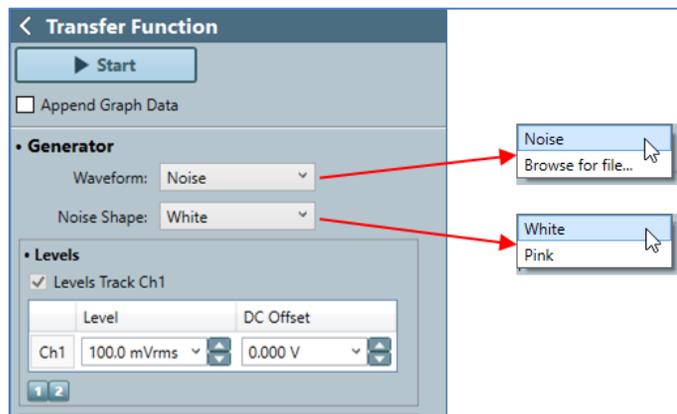


図5. 伝達関数ジェネレーター設定画面

### アナライザーの設定

図6のように、伝達関数測定のアナライザーの設定には多くの情報を設定することができます。上から順に説明していきます。

- **Reference**はDUTの入力に適用する信号を選択します。選択肢は、ジェネレーターまたは入力チャンネルです。物理的な出力コネクタが選択する場合は、参照のデフォルト値はジェネレーターです。

伝達関数解析の入力信号はAP x ジェネレーターバッファから、直接取得するので、アナライザーの入力チャンネルの1つで、刺激信号を測定する必要はありません。Referenceのもう一つの選択は、チャンネルセレクターを備えた入力チャンネルです。これにより、必要に応じて、リファレンス（または入力）信号を直接測定できます。

- **Match**は、一種のトリガーとして利用します。入力信号を取得すると、システムは基準信号の開始と指定された入力チャンネルの連続する信号ブロックとの相互相関を利用して、一致する信号を見つけようとします。一致には、高、中、低の選択肢があり、トリガー条件が満たされるには、取得した信号が基準信号の開始部分とどの程度一致する必要があるか指定します。一致する前の信号は伝達関数分析が除外されます。MatchもNoneを選択できます。入力信号全体が分析に含まれることとなります。

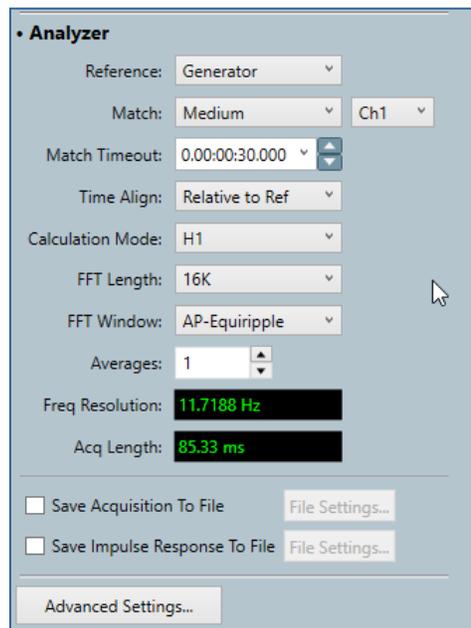


図6. 伝達関数アナライザー設定画面

- **Match Timeout** は一致する信号が見つからない場合にアナライザーが測定を中止するまでの時間を指定できますデフォルト値は30秒です
- **Time Align** は入力信号をリファレンス信号と時間調整する方法を指定します。Relative of RefとRelative of Chの選択ができます。
  - Time AlignがRelative to Refの場合、全ての入力チャンネルはリファレンス信号に合わせ、各チャンネル

の遅延は最初の入力チャンネルとそのチャンネルの一致条件との間の時間として表示されます。

○ Time AlignがRelative to Chを設定した際、指定チャンネルがリファレンスと時間調整できるよう、指定したチャンネルの遅延が全入力チャンネルから削除されます。この際、指定したチャンネルの遅延は0秒と表示され、他の全てのチャンネルに判明する遅延は、そのチャンネルの信号一致と指定したチャンネルとの間の時間です。この時間調整はチャンネル間の位相関係を維持する為、マイクアレイに最適です。

- Calculation ModeはH1、H2、マグニチュードから選択します。

- FFT Lengthは伝達関数分析で累積した平均ごとに分析するサンプル数を指定します。1kから120Mまで選択できます。

- FFT Windowは分析で利用するウィンドウのタイプを選択できます。デフォルト値はAP-Equirippleです。

- Averagesは伝達関数の平均結果に累積されるデータブロックの数を指定します。

- Averagesは1より大きい値に設定されている場合、オーバーラップコントロールが表示されます。これは0, 25, 33, 50, 67, 75%を選択し、分析される連続したデータブロック間のオーバーラップを指定します。オーバーラップ処理は時間と共に変化するエンベロープ（音声や音楽など）を持つ信号を分析する場合により効率的です。

- Freq ResolutionとAcq Lengthはインジケータです。

- Freq Resolutionは現在の周波数解像度を表示します。サンプルレートとFFTに依存します。

- Acq Lengthは分析する信号の全長を秒単位で表示します。これはサンプルレート、FFT長、平均の数、オーバーラップに依存します。

- Save Acquisition to File は取得した信号を1つ以上の.wavファイルとして保存する機能です。

- Save Impulse Response to Fileはインパルス応答の結果を1つ以上の.wavファイルとして保存する機能です。各インパルス応答結果はインパルス応答の最大または正のピークが+1.0Dまたは-1.0Dにスケールされるように任意のスケールされることに注意願います。

## 測定結果

伝達関数測定は、図7のような16の主要な結果表示が可能です。計算モードがマグニチュードのみの設定の場合は、位相、コヒーレンス、インパルス応答の結果は利用できません。

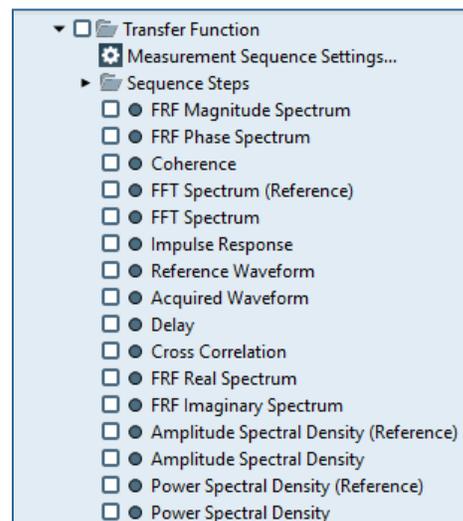


図7. 伝達関数測定結果表示

## 測定例: スマートスピーカーI/O

オーディオテストで困難なタスクの一つとして、スマートスピーカーの入出力システムの周波数応答の測定が挙げられます。スマートスピーカーはオーディオ入力が「ウエイクアップワード」で始まる音声コマンドから形成されている点です。音響コマンド信号はデジタル化され、Webを介してサーバーにて処理されます。デバイスからの出力は、サーバーから発し、デバイスのパワードスピーカーで再生される音声または音楽信号が聞こえる仕組みです。その為、オープンループテストが必須となります。次の二つのセクションでは、伝達関数測定を用いたオープンループ技術によるスマートスピーカーの入出力システムテストの例を説明致します。

## スマートスピーカー入力システム

Amazon Alexaなどのシステムは音声コマンドを読みこんでユーザーのWebポータルサービスから再生、及び聴取可能なオーディオファイルを取得します。録音されたオーディオは.wavファイルとして取得できます。この.wavファイルと元の音声コマンドを含む.wavファイルとAPxの伝達関数測定を利用して、システムの周波数応答を決めることができます。デバイスをテストする際は、業標準に準拠する条件での測定を推奨致します。スマートスピーカーのテストを対象としたETSI TS103 738のテスト基準を利用します。この規格では、DUTをテーブルの端から40cmの場所に設置し、無響室で測定することをお薦めしています。テーブルの端にあり、DUTの30cm上にマウスシミュレーターを利用して、入力信号を発生します。テストの様子は図8に示します。

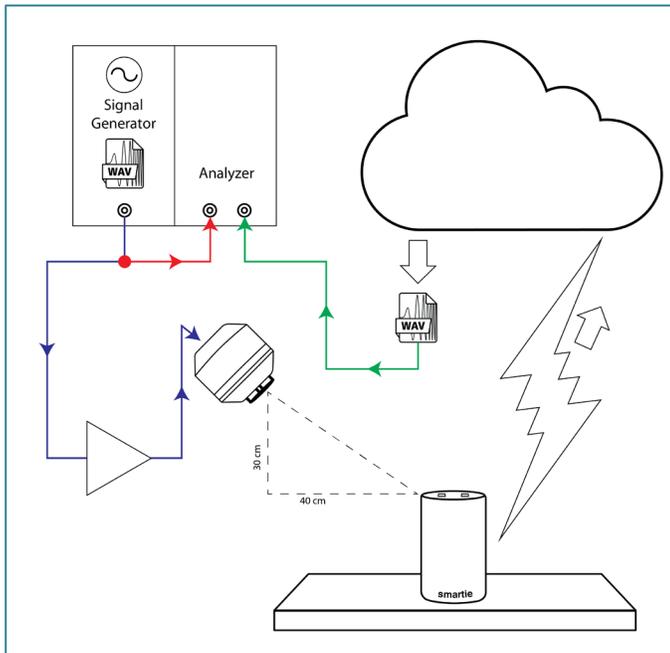


図8. スマートスピーカー入力システムの伝達関数測定図

次の手順でスマートスピーカー機能をテストします。

1. マウスシミュレーターを調整する際は、MRP (Mouth Reference Point)と呼ばれる特別な定点測定用のマイクが必要です。APxアナログ入力システムがdBSLで表示するように、音声校正器またはAPx1701で構成したTEDSを使って調整する必要があります。
2. 基準マイクをMRPIに配置し、対象の周波数範囲(100Hz-16kHz)において周波数応答がフラット±0.5dBになるようにマウスシミュレーターを校正及びEQします。図9を参照ください。
3. 100Hzから8kHzの広帯域エネルギーを含む音声刺激信号を選択します。今回はnightclub chatterという曲を利用致します。

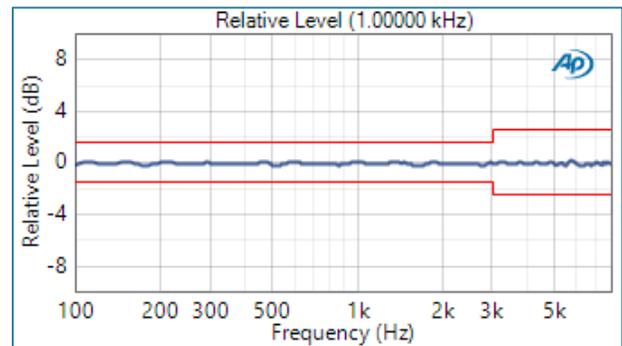


図9. EQ後のマウスシミュレーター周波数応答

4. オーディオ波形エディターを利用してスマートスピーカーのウエイクアップワードを与え、その後短時間の無音を音声刺激信号に付加します。(図10)

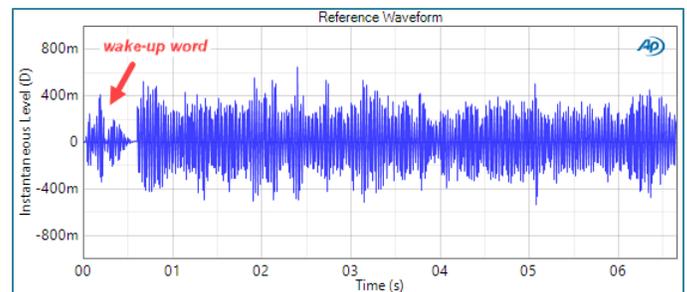


図10. スマートスピーカー入力システムを刺激し、ウエイクアップワードとそれに音声チャッターの波形

5. 伝達関数分析を行うには、リファレンス信号と応答信号のサンプルレートが一致する必要があります。オーディオエディターを利用して、ウエイクアップワードで刺激信号をリサンプルし、スマートスピーカーシステムで記録したオーディオファイルのサンプルレート(この場合16kHz)と一致させて、.wavファイルを保存します。これが伝達関数解析の基準波形となります。

6. 信号のRMAレベルを測定する為に利用できる測定(Noise RecorderとRMS Level derived result)を利用してジェネレーター波形として.wavファイルをロードします。リファレンスマイクでMRPのRMSレベルを測定し、目標音圧レベル(SPL)が測定されるまで、ジェネレーターレベルを調整します。注意：スピーカーホンの場合、ETSI規格ではMRPで-4.7dBPa (89.3dB SPL)が指定されています。
7. スマートスピーカーをONにして刺激信号を発します。
8. スマートスピーカークラウドポータルにログインし、スマートスピーカーで録音した信号の.wavファイルをします。注意：開発者モードでWebブラウザを利用して、オーディオファイルのURLを別のWebページにコピーし、それをおを.wavファイルとして保存できます。
9. APxソフトウェアで出力コネクタはNone(外部)に入力コネクタをファイル(Digital unit)に変更します。
10. 伝達関数測定をSingal Pathに追加し、次のように校正構成します。
  - a. 上記で作成した.wavファイルをリファレンスに設定します。
  - b. サーバーから取得した.wavファイルをファイルリストに追加します。
  - c. MatchをMediumにします。
  - d. Time AlignをRelative to Refにします。
  - e. Calculatio ModeをMagnitude Onlyに設定します。注意：スマートスピーカーシステムから取得したファイルのサンプルレートが参照ファイルのサンプルレートと一致する可能性は殆どないのでこのアプリケーションではMagnitude Onlyを利用しています。
  - f. 必要に応じてFFT長を設定します。(例、16kは1.0Hz未満の周波数分解能になります。)
  - g. スピーチチャッターなどの信号を利用する場合は、スマートスピーカーシステムはスピーチを認識せず、数秒後にギブアップしてファイルが短くなります。図11では録音されたオーディオファイルの長さは7秒です。このように短いファイルを最大限に利用するには、オーバーラップを75%に設定し、取得長インジケーターがファイルの長さになるように平均を設定するようにします。

h. 伝達関数を解析結果を確認します。

図12は、同じ信号の基準信号とDUT信号のスペクトルを示しています。図13は周波数応答の大きさを示しています。この場合、2つの測定したスペクトルの比率として計算します。図13で測定されたFRFのマグニチュードは、約1kHzを超える周波数で次第に、ノイズが増えるように見えるので注意してください。これはDUT波形のサンプルレートが参照波形のサンプルレートとわずかに異なるからです。測定したFRFマグニチュードが平滑化された場合、波形は平均とを適切に表しています。(この場合、1/12オクターブの平滑化を利用しています。)

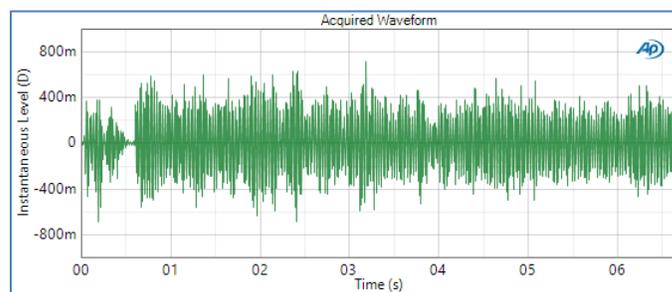


図11.スマートスピーカー入力システムで記録しクラウドから取得した波形

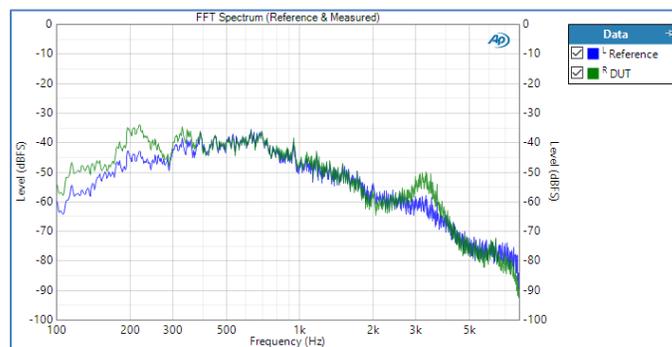


図12. 刺激信号(参照)とスマートスピーカー入力システムで記録した信号のFFTスペクトル

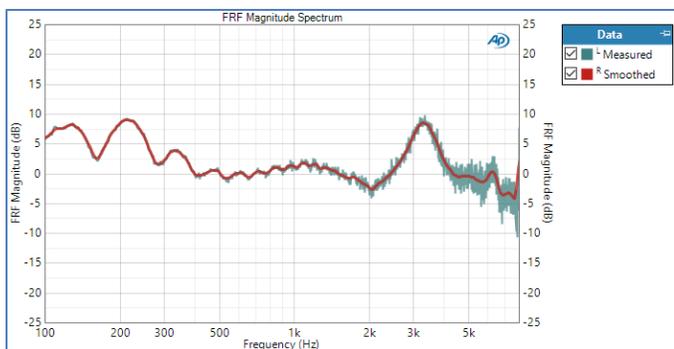


図13. マグニチュード計算モードの伝達関数測定を利用し、決定したスマートスピーカー入力システムの周波数応答マグニチュード

比較の為、0.35、1.0、4.0秒の掃引長でオープンループチャープを利用して、同じスピーカー入力システムの周波数応答を測定致しました。図14に示すように、チャープ信号によるDUTの応答は、掃引長が長くなるとかなり異なります。これは、スマートスピーカーシステムのDSPがチャープをサイン波信号として認識し、デバイスに音声刺激を使用することを意味しています。

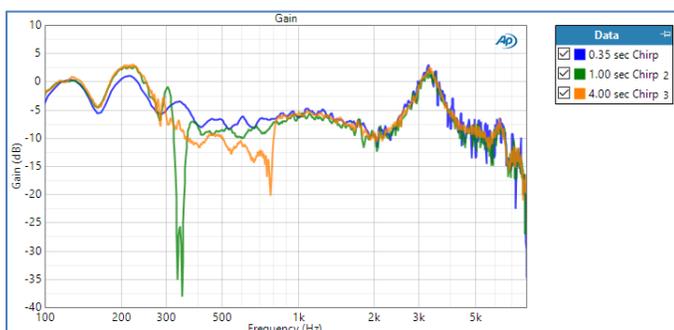


図14. オープンループチャープで測定したスマートスピーカー入力システムの周波数応答マグニチュード

## スマートスピーカー出力システム

スマートスピーカーシステムの出力信号は、サーバー上のオーディオファイルから発信します。音楽信号を利用してサブシステムの伝達関数を測定できますが、これを行うには、アナライザの元のファイルのコピーを参照する必要があります。簡単に行う方法としては、リファレンス波形のファイルを作成して、それをスマートスピーカーからアクセスできるサーバーにロードする事です。一部のシステムでは、ログインアカウントを利用して、オーディオファイルをスマートスピーカーのサーバーに格納します。この場合、スマートスピーカーがアクセスできるサードパーティのサーバーにファイルを置く事もできます。

利用するサーバーに関係なく、ファイル形式やサンプルレート等に制限の発生する可能性があります。例えば、PlexのSkillをインストール後、Amazon AlexaシステムではPlexサーバーを利用しました。この際、サンプルレートが44.1kHzでMP3形式にエンコードされ、曲とアーティストを識別するマルチメディアが付いたオーディオファイルが必要でした。波形エディタを利用して、ファイルのサンプルレートを変更し、MP3形式で保存できます。マルチメディアタグはWindows Media Player等のプログラムで編集できます。

伝達関数測定ではマッチングアルゴリズムを利用してDUTからの出力信号を基準波形に時間調整します。これはスマートスピーカーをテストする場合に便利です。

(呼びかけ)「スマートスピーカー・my\_serverからアーティスト名～のmy songを再生して」のような音声コマンドを発行した後、システムがコマンドを認識して曲にアクセスできる場合、しばらくしてから応答します。「OK. my\_serverでアーティスト～のmy songの再生します」等のメッセージに続いて、要求されたオーディオトラックが続きます。伝達関数測定では、応答前のいつでも測定を開始し、一致アルゴリズムを利用して音楽信号を基準波形に時間調整できます。

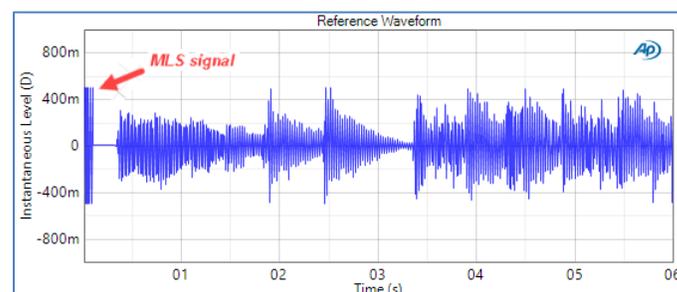


図15. MLS信号が付加された音楽波形の最初のセッション

音楽信号の利用に伴う潜在的な問題の一つは音楽が一般的に非常に反復的であることで、信号の間違った部分でアルゴリズムがトリガーされる可能性が高いことです。好条件を導き出す方法は、刺激信号の前に最大長シーケンス (MLS) と呼ばれる信号の短いバーストを付加する事です。MLSはホワイトノイズによく似た特殊な波形ですが、照合アルゴリズムによる検出を容易にする特長があります。さまざまなサンプルレートの短いMLS信号を含む一連の.wavファイルがAP.comから入手できます。図15は最初にMLS信号の100ミリ秒のバーストがある音楽信号の始まりを表しています。

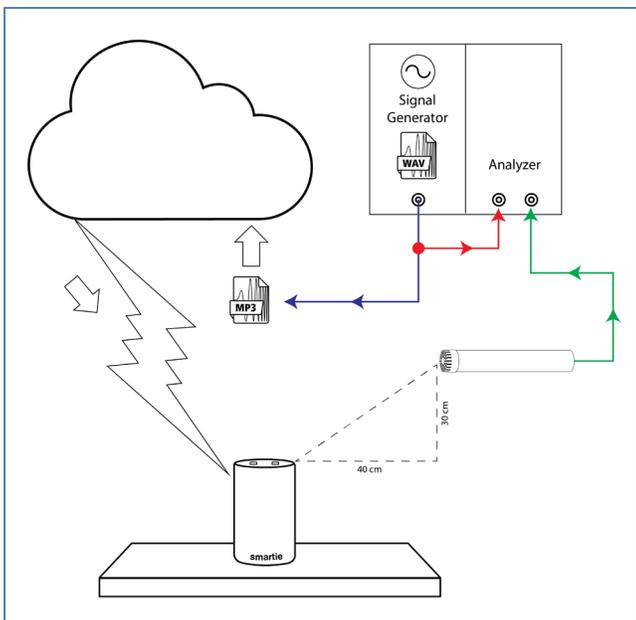


図16. スマートスピーカー出力システムの測定イメージ

スマートスピーカーの出力パスのテストセットアップは入力パスに似ていますが、スピーカーの出力を測定する為にマウスシミュレーターではなく測定マイクロホンをテーブルの端でかつDUTの30cm上に設置します。図16を参照ください。

次の手順にてスマートスピーカー出力機能を測定します。

1. 上記で作成したリファレンスのオーディオファイルをサーバーにアップロードし、スマートスピーカーがアクセスできることを確認します。
2. APxソフトウェアでOutput ConnectorをNone (External)に、Input ConnectorをAnalog Unbalanced (またはAPx1701を利用の場合は、Tranduser Interface)に設定します。
3. 入力モードをAcousticに設定し、入力単位を Pa (又は dB SPL)になるようにマイクを校正します。
4. Transfer Function MeasurementをSignal Pathに追加し、以下のように構成します。
  - a. Referenceに上記で作成した.wavファイルを設定します。
  - b. MatchをMediumに設定します。
  - c. Time AlignをRelative to Refに設定します。
  - d. Calculation ModeをMagnitude Onlyに設定します。システムのサンプルレートはリファレンスの.wavファイルとは少し異なります。

- e. FFT長を必要に応じて設定します。  
(例えば、44.1 kHzで16kHzを利用すると、周波数分解能は3 Hz未満になります。)
- f. 必要に応じて、オーバーラップコントロールと平均コントロールを設定します。この例では平均値322と50%のオーバーラップを利用した為、取得時間の合計は60秒になります。
- g. スマートスピーカーにリファレンスオーディオファイルを再生するようにさせ、伝達関数の測定を開始します。注意：別の方法として、音声コマンドを録音し、テストチャンバー内のスピーカーを介して別のSignal Pathから生成することもできます。
- h. オーディオアナライザは信号の一致を検出すると、トリガーし、取得したデータを処理します。測定結果を見てみましょう。

図17は入力信号の取得開始を表しています。参照信号との類似性に注意ください。(図15) この場合、Delay meterの結果の値は、1.375秒で測定開始後、シグナルマッチするまでの時間を示しています。

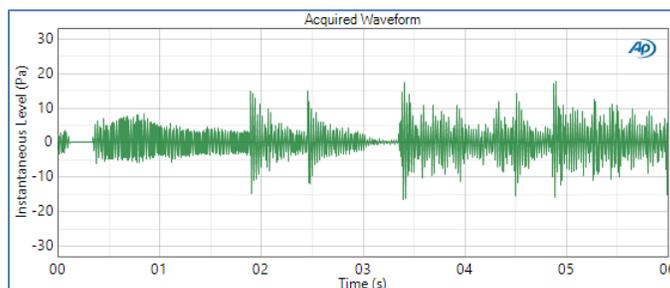


図17. スマートスピーカーの音響出力信号 (単位Pa)

図18~20は、基準信号のスペクトル、スマートスピーカー出力信号のスペクトル、及び伝達関数の大きさを示します。リファレンス信号と応答信号は「ピーキー」な性質にもかかわらず、伝達関数のマグニチュードの大きさは比較的なめらかな曲線です。Smooth derived resultを利用して、スムージングを追加適用できます。

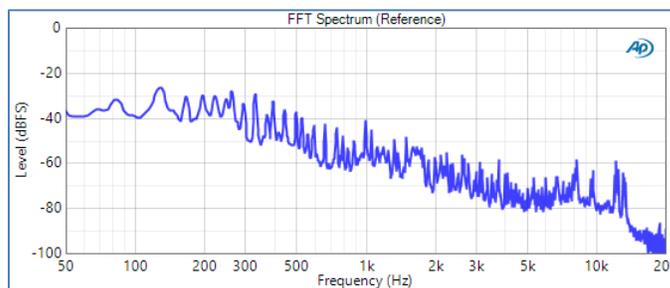


図18. 基準信号のスペクトル

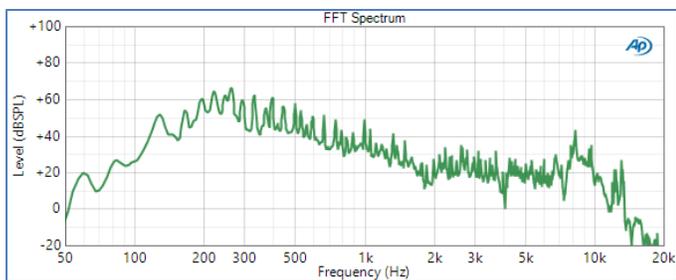


図19.取得した音響信号のスペクトル

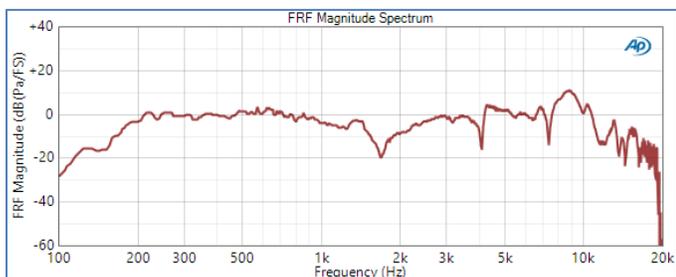


図20. 平滑化されていないスマートスピーカーの測定された伝達関数の大きさdB(Pa/FS)

## 例: デジタルマイク

APx500ソフトウェアVersion6では、デジタルマイクテストをサポートする為の機能、マルチ入力追加されました。この機能により、アナログとデジタルの2つの異なる入力コネクタで同時に測定できます。その為、デジタルインターフェース (PDM, Bluetooth, A2B, デジタルシリアル等) 上のアナログ基準測定マイクとDUTマイクを同時測定できる為、デジタルマイクのクローズドループテストが可能となります。次の2つのセクションでは、PDMマイクとBluetoothヘッドセットのマイクを測定用マイクに対してテストする方法を示します。

### PDM マイクの例

マイクはDUTと基準マイクを音場に正確に設置するフィクスチャを利用して、バックグラウンドノイズの少ない無響室でテストする必要があります。補聴器のテスト用に設計された小さなテストチャンバーを利用しました (図21)このデスクトップチャンバーは約40dBのノイズ分離を提供し、500Hz以上で無響であり通常、音声周波数範囲の音響テストに利用します。100Hz~10kHzで±3dB (チャンバーエンブティ) 以内のフラットな周波数応答を持つフルレンジスピーカーを備えています。



図21. TBS25サウンドテストチャンバー



図22. PDMマイクと基準マイク

この場合、DUTは2つのMEMS PDMマイクがステレオペアとして、配線された幅約11mm, 長さ25mmの小さな基板です。DUTマイクは電源 (Vdd) とクロック信号を供給するAPx PDMモジュールに接続され、PDM信号をマイク信号からアナライザに送信して処理します

DUTは、図22のチャンバーのテストポイントに設置され、基準マイク(短いプリアンプを備えた1/2インチの圧力応答マイク)と一緒に設置されます。チャンバーのテストポイントはスピーカーの前にある水色の円の中心です。これは、スピーカーの正面と軸上にあるポイントであり、この小さなチャンバーでの音響測定に推奨される場所です。この測定ではAPx1701を利用してCCPパワーをリファレンスマイクに供給し、チャンバーのスピーカーを駆動します。APx500ソフトウェアVer6.0のマルチ入力機能では、1つ目の入力をリファレンスマイクを測定し、2つ目の入力をPDM(またはPDM16)モジュールを利用してDUTマイクを測定します。手順としては次の通りです。

1. 入力1をAcoustic Input Modeに設定し、サウンドレベル校正器またはTEDSを利用して基準マイクを構成します。
2. 出力をAcoustic Modeに設定し、マイクをテストポイントに設置して、測定マイクをターゲットにしたレギュレーションを利用して、基準周波数(1.0kHz等)に音響出力レベルを設定します。
3. リファレンスマイクの周波数応答を測定し、反転脚相対応答を出力EQとして適用し、テストポイントでのスピーカーの応答をフラットにします。
4. PDMマイクに入力2(PDMモジュール)を設定します。(デフォルト設定を利用し、Vddとレシーバー出力をONにします。)
5. Transfer Function測定を追加し、以下のように設定します。
  - a. 波形: ピンクノイズ
  - b. リファレンス: Input 1, Ch1 (アナログ測定マイク)
  - c. Match: PDM Ch1.
  - d. Time Align: Relative to Reference.
  - e. Calculation Mode: H1
  - f. FFT長(必要に応じて)、平均、オーバーラップ 今回58アベレージ、長さ16k FFT,50%のオーバーラップ、48kHzのサンプルレートで2.93Hzの周波数分解能で合計10秒の長さを取得。

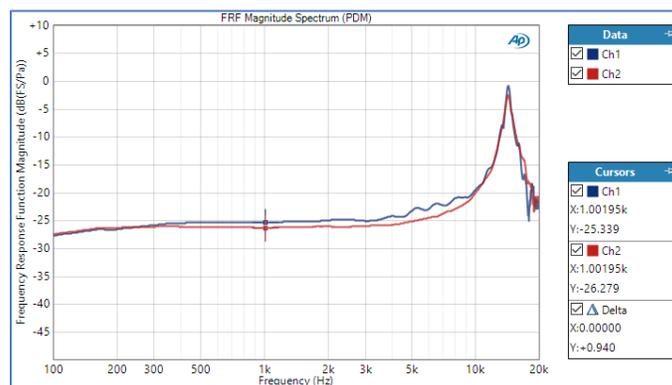


図23. 測定マイクに対するDUTのPDMマイクの周波数応答の大きさ

図23は、測定マイクと比較したPDMマイクのFrequency Response Magnitudeの測定結果を表しています。単位はdB(FS/Pa)です。このグラフは、周波数に対するDUTマイクの感度を表しています。2つのマイクの感度を識別する為に、カーソルは1.0kHzの2つのトレースを追加しています。-25.3及び26.1dB(FS/Pa)です。このタイプのPDMマイクとしては標準値です。

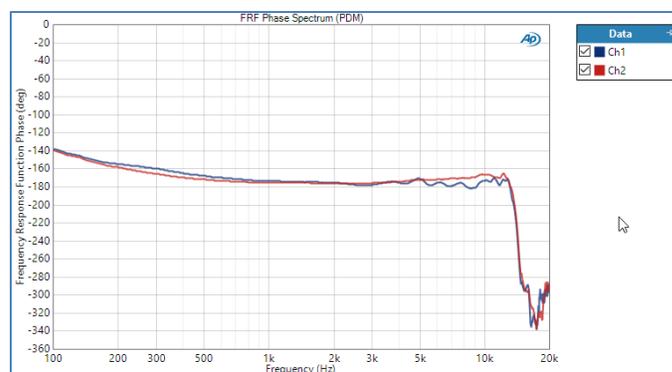


図24.測定マイクに対するDUTのPDMマイクの周波数応答位相

図24は基準マイクに対するPDMマイクの位相応答を表しています。位相曲線のノッチと10kHzを超える振幅曲線のピークは、DUTマイクの共振周波数は約14kHzです。このタイプのMEMSマイクの典型的なものです

図25はPDMマイクと基準マイクの間で測定されたコヒーレンス関数です。曲線は基本的に50Hzから約16kHzまで単一であり、周波数範囲内で良好な測定となっています。

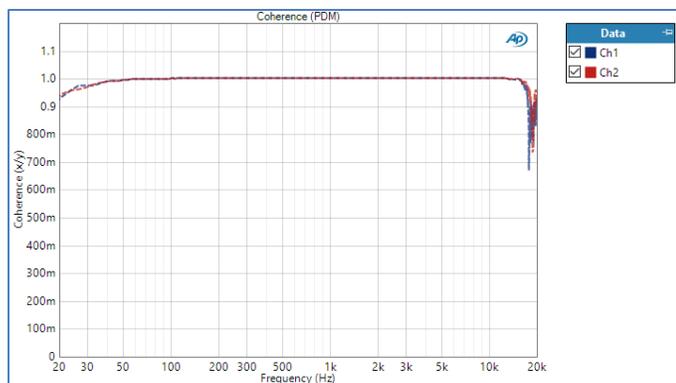


図25. 伝達関数測定を使ったDUTマイクと測定マイク間のコヒーレンス

### Bluetoothヘッドセットマイクの例

この例は、DUTがBluetoothヘッドセットのマイクであることを除けば、上記のPDMマイクに似ています。(図26)このデバイスは、一対のアナログヘッドホンをBluetoothヘッドセットに変換します。アナログ入力ジャックに接続したアナログヘッドホンは、Bluetooth A2DP経由で音楽を聞いたり、HFP経由で音声通話を聞けます。アダプターにはマイクが含まれており、ラベリアマイクのようなユーザーの衣服に留めることができます。前例と同様に、このDUTはマイクロホンがテストポイントの測定マイクと同じ場所に設置された小型補聴器テストチャンバーでテストしました。(図27)



図26. テストしたBluetoothヘッドセットアダプター



図27. チャンバー内のテストポイントにあるDUTマイクと測定マイク

今回Bluetoothマイクをテストする為に、PDMマイクの例を同じ手順で利用しましたが下記の点は異なります。

- 入力2をBluetoothに設定し、APxのBluetooth設定コントロールを利用してDUTとペアリングを行い、3つのBluetoothプロファイル全てに接続してからSCOを開き、APxアナライザにハンズフリー接続を行いました。
- Bluetooth接続では本質的にタイミングが不安定な為、伝達関数の計算モードはMagnitude Onlyに設定します。伝達関数マグニチュードをdB SPLでBluetoothマイクのスペクトルから、dB SPLの基準マイク信号のスペクトルを引いたものとして計算されます。

Transfer Functions Magnitude測定の悔過を図28に表示しました。グラフにはdB (FS/Pa)の単位でDUTマイクの感度と周波数の関係を表しています。元のデータ(赤いトレース)は非常にノイズが多く、Bluetooth接続での固有のタイミングの問題が原因と見受けられます。データを1/12オクターブ(青のトレース)で平滑化すると、DUTマイクの周波数応答を推定できます。その時点で有効なボリューム設定は、1kHzでのDUTの感度は35dB (FS/Pa)となります。

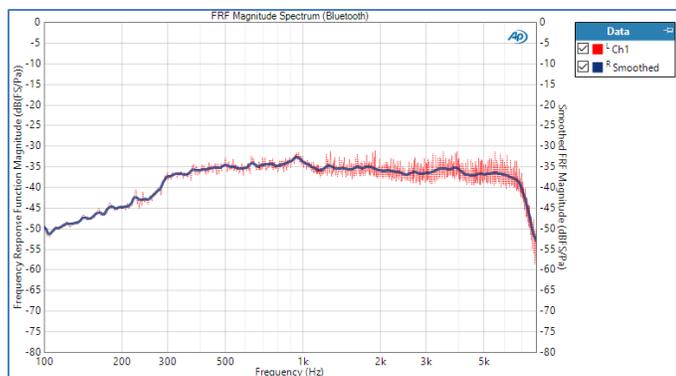


図 28. 元の線(赤いトレース)と1/12オクターブの平滑化(青のトレース)の周波数応答測定マイクに対するBluetoothマイクのマグニチュード

## 総論

APxソフトウェアVersion5.0以降で利用可能な伝達関数測定は、様々なアプリケーションで利用できるAPx測定ツールボックスの1つになります。音声刺激を必要とするデバイスやオープンループをテストする必要のあるデバイスに特に役に立ちます。APxソフトウェアVersion6.0に追加されたマルチ入力機能により、デジタルオーディオインターフェースを利用するPDMマイクやその他のマイクを簡単にテストできます。